

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.021

基于线性平行粘结接触模型的岩石细观参数选取方法研究

刘良军¹, 曹 智², 王俊杰^{3,4}

(1. 重庆腾云工程咨询有限公司, 重庆 400020; 2. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007;
3. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
4. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘 要: 基于研究线性平行粘结接触模型中的细观参数与单轴压缩试验应力-应变曲线及试样破坏形式的对应关系, 将细观参数分为四类。I类, 对峰值应力及其应变量敏感, 但对初始弹性模量不敏感; II类, 对应力峰值和初始弹性模量 E_0 均敏感; III类, 对试样应力-应变曲线的各特征值均不敏感; IV类, 对试样破坏形式敏感。利用上述分类结论, 制定了岩石细观参数的选取方法: 拟合初始弹性模量 E_0 ; 拟合应力峰值及其对应的应变量; 调整破坏模式; 结果微调。

关键词: 岩石; 细观参数; 线性平行粘结接触模型; 数值模拟

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0123-06

Selection Methods of Rock Micro-parameters Based on the Linear Parallel Bond Contact Model

LIU Liangjun¹, CAO Zhi², WANG Junjie^{3,4}

(1. Chongqing Tengyun Engineering Consultant Co., Ltd., Chongqing 400020, China;

2. Hu'nan Hydro&Power Design Institute, Changsha, Hu'nan 410007, China;

3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

4. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The PFC^{2D} model of rock sample is developed based on the linear parallel bond contact model. Micro-parameters is divided into four categories upon the foundation of the correspondence relationship between micro-parameters and macro-properties. Micro-parameters named class I have little influence on initial elastic modulus, but have obvious impacts on the peak stress and its strain. Micro-parameters named class II have marked impacts on initial elastic modulus, peak stress and its strain. Micro-parameters named class III have little influence on the characteristic stress-strain curves. Micro-parameters named class IV have great impacts on damage form of rock sample. The dissimilarities on the effect of micro-parameters to macro-properties are used, and the selection method of rock micro-parameters is produced as detailed below. Fitting the initial elastic modulus E_0 ; Fitting the peak stress and its strain; Adjusting the damage form; Fine-tuning the result.

Keywords: rock; micro-parameter; the linear parallel bond contact model; numerical simulation

近年来, 基于离散单元法求解非连续介质力学问题成为岩土类材料特性数值分析的一个热点研究方向。研究人员对此开展了不少有意义的探索, 在

岩石断裂与损伤^[1-3]、边坡稳定及滑坡机理分析^[4-5]、围岩稳定性^[6]、桩土复合地基承载机理^[7]等方面都取得了丰富的研究成果。

然而,如何科学地确定与材料宏观特性相匹配的细观参数成为研究人员开展可靠的数值模拟的重要前提。因此,国内外的学者们开展了大量的土石材料的细观参数及其宏观特性之间定性或定量的关系研究。在岩石材料的研究方面,Huang H Y^[8]基于PFC^{2D}内置黏性接触模型(contact bond model)对岩石单轴压缩试验进行了研究,认为单轴压缩强度特性基本不受承压面的宽度与颗粒半径之比的影响。Nardin A 等^[9]定性地研究了黏性材料细观参数及其宏观特性之间的关系。Hsieh Y M 等^[10]研究了砂岩的细观组分含量、变形机制以及砂岩宏观力学特性之间的关系。徐金明等^[11]构建了含裂隙的石灰岩离散元模型,并解释了相关细观参数的含义。丛宇等^[12]结合大理岩室内试验数据,定量地分析了大理岩的宏细观参数间的关系。赵国彦^[13]等基于线性平行粘结接触模型(linear parallel bond contact model)研究了颗粒单元半径比、刚度比等参数对宏观变形特性的影响。相比于岩石材料,非黏性土料方面的宏细观研究略为丰富,并以周健等^[14]、尹成薇等^[15]、徐小敏等^[16]以砂土类材料为研究对象的分析居多。

目前针对岩石类材料的细观参数选取方法缺少系统性研究,大部分研究成果为基于砂土类材料特性的基础之上得出,并未给出细观参数选取方法或步骤,多为定性分析。本文基于线性平行粘结接触模型(the linear parallel bond contact model),对岩石细观参数机器宏观特性之间的关系开展了大量模拟工作,以不同细观参数对应力-应变曲线特征及试样断裂形式的影响效果为基础,归纳岩石类材料的基本单元的选取方法和细观参数的选取方法,力求为岩石类材料细观参数的研究提供一些有价值的认识和讨论。

1 试验方案及结果分析

1.1 模型构建

岩石试样在受到外力作用后可能会发生破碎,假定当碎屑粒径小于一定值后,该颗粒将不再发生破碎。利用“等质量逐级替换最细颗粒”方法对试验室用砂岩料的级配曲线进行修正^[17],综合考虑工作站的运行效率,取修正后的砂岩料级配中的最小粒组 1.0 mm~2.0 mm 作为基本颗粒单元。

如图 1 所示,本文构建的岩石单轴压缩试验模拟系统主要包括以下几个部分:岩石离散元试样(50 mm×100 mm),加载模块,数据采集模块。试样

模型中的基本颗粒单元通过线性平行粘结接触属性连接。本岩石试样共生成 8 268 个接触,且每个接触的线性平行粘结模型属性均被激活。

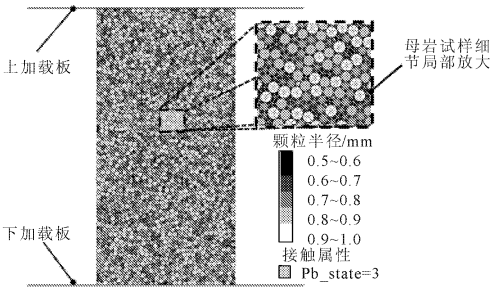


图 1 岩石试样单轴试验模型示意图

1.2 试验方案

岩石试样单轴试验数值模拟方案见表 1。

表 1 接触属性取值表

细观参数名称	取值
等效模量 E^*/GPa	0.01、0.05、0.10、0.50、 <u>0.10</u>
黏性等效模量 $\bar{E}^*/\text{GPa}$	0.01、0.05、0.10、0.50、 <u>0.10</u>
刚度比 κ^*	0.0、0.1、0.5、 <u>1.0</u> 、2.0、10.0、50.0
黏性刚度比 $\bar{\kappa}^*$	0.0、0.1、0.5、 <u>1.0</u> 、2.0、10.0、50.0
抗拉强度 $\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	1、5、 <u>10</u> 、50、100
摩擦系数 μ	0.0、0.1、 <u>0.5</u> 、1.0、2.0
黏聚力 $\bar{c}/\text{MPa}$	5、10、 <u>50</u> 、100、500
摩擦角 $\phi/(\circ)$	<u>0</u> 、45、90、135、180、225、270、315、360

注:表中数值加粗并带下划线的数值为基准值。

采用单一变量法逐一对线性平行粘结模型中的各细观参数进行敏感性分析。虽然不同细观参数的取值区间有所差别,但是均设定了一个基准值试验参数,以便进行平行比较。

1.3 敏感性分析

将各个细观参数的取值进行归一化处理,从而转化为无量纲的值,分析细观参数对应力-应变曲线特征量的敏感性,见图 2~图 4。

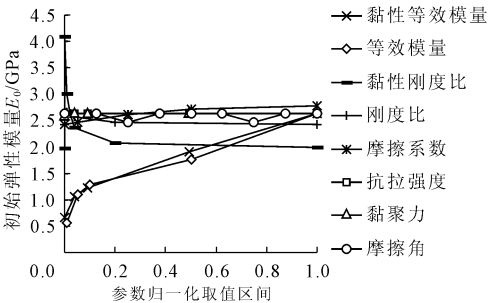


图 2 细观参数对初始弹性模量的影响

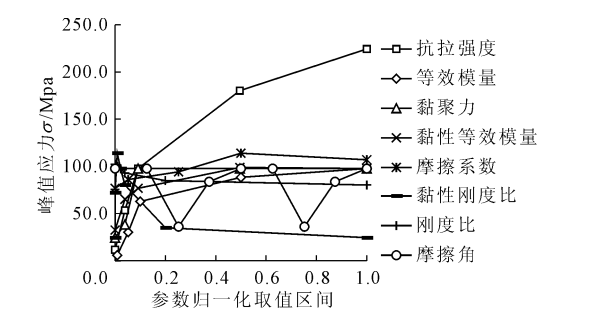


图 3 细观参数对峰值应力的影响

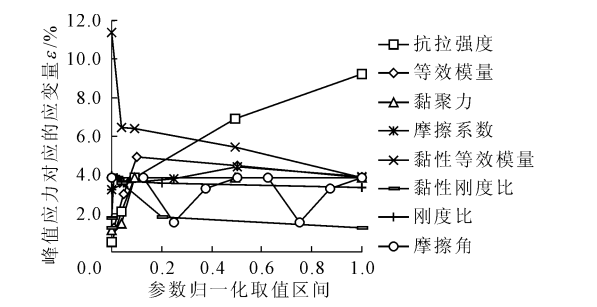


图 4 细观参数对峰值应力对应的应变量的影响

由图 2、图 3、图 4 可知,随着线性平行粘结接触模型中各细观参数取值的增大,对应力 - 应变曲线特征量的影响趋势可分为四类:① 产生正效应的系列曲线;② 产生负效应的系列曲线;③ 产生周期性效应的系列曲线;④ 几乎无影响的系列曲线。结合细观参数对颗粒间接触破坏的影响,将线性平行粘结模型中的细观参数按对不同宏观特性的敏感性程度分为以下四类:

I 类:对峰值应力及其应变影响较敏感,但对初始弹性模量影响极小,如抗拉强度、黏聚力等细观参数(见图 5、图 6)。

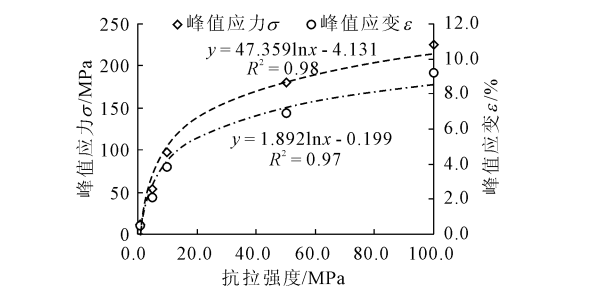


图 5 抗拉强度与峰值应力及其对应的应变值的关系

由图 5 知,随着抗拉强度值变大,峰值应力值呈变大的趋势,但增幅逐渐减小,拟合抗拉强度和峰值应力的变化关系如下:

$$\sigma = 47.359\ln\sigma_c - 4.131$$

(1)

由图 5 还知,随着抗拉强度值变大,峰值应力对应的应变值同样呈变大趋势,拟合两者的变化关系如下:

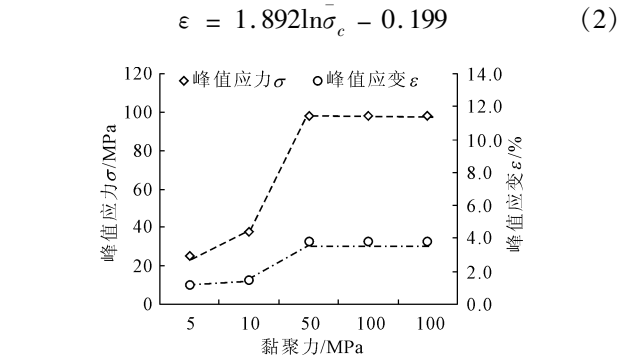


图 6 黏聚力与峰值应力及其对应的应变值的关系

由图 6 可知,黏聚力取值 50 MPa 时为黏聚力与峰值应力及其对应的应变值的变化趋势的一个转折点:当黏聚力小于 50 MPa 时,随黏聚力值的变大,峰值应力呈变大趋势。当黏聚力大于或等于 50 MPa 后,随黏聚力值的变大,峰值应力的取值始终保持在 98.0 MPa 附近不变。

峰值应力所对应的应变值有类似的规律:当黏聚力大于或等于 50 MPa 后,随黏聚力值的变大,峰值应力对应的应变值始终保持在 3.85% 附近不变。

II 类:具有复合影响效果,对应力峰值和初始弹性模量 E_0 均为敏感,如等效模量、黏性等等效模量以及黏性刚度比等细观参数(见图 7、图 8、图 9)。

由于 I 类细观参数仅对峰值应力及其对应的应变值敏感,因此在分析 II 类细观参数对应力 - 应变曲线特征量的敏感性时,可利用 I 类细观参数的特性,化 II 类复合型影响效果为单因素影响进行分析,仅分析 II 类细观参数对初始弹性模量的 E_0 影响效果。

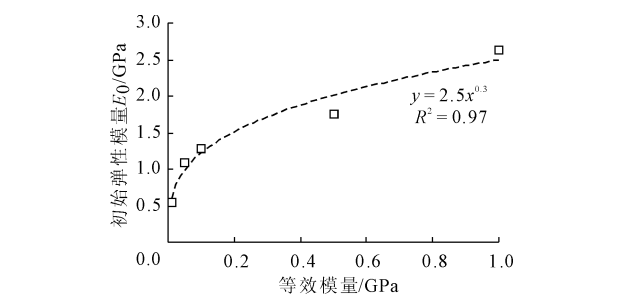


图 7 等效模量与初始弹性模量 E_0 的关系

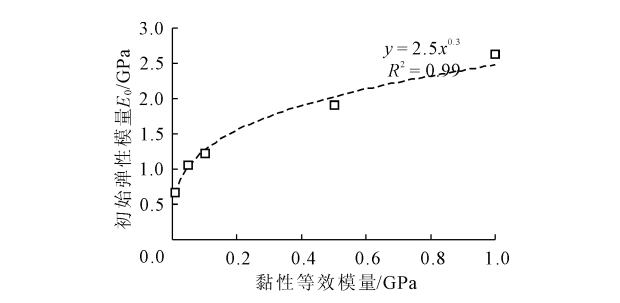


图 8 黏性等效模量与初始弹性模量 E_0 的关系

随着等效模量取值的变大,初始弹性模量相应增加,拟合的表达式为:

$$E_0 = 2.5E^{*0.3} \quad (3)$$

由图 8 可知,黏性等效模量与初始弹性模量之间拟合的关系表达式为:

$$E_0 = 2.5\bar{E}^{*0.3} \quad (4)$$

根据 PFC 软件中关于颗粒黏性刚度比 $\bar{k}^*$ 的定义:

$$\bar{k}^* = \frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s} \quad (5)$$

当颗粒黏性刚度比 $\bar{k}^*$ 等于零时,定义法向刚度或切向刚度为零,即 $\bar{k}_n = 0$ 或 $\bar{k}_s = 0$ 。因此对颗粒黏性刚度比 $\bar{k}^*$ 的非零取值结果系列进行函数拟合。

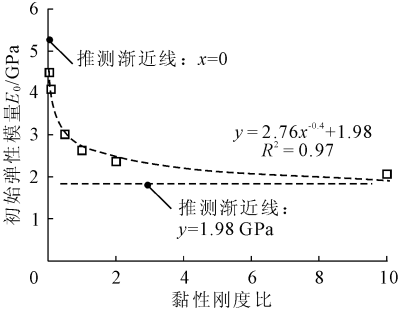


图 9 黏性刚度比与初始弹性模量 E_0 的关系

由图 9 可知,随颗粒黏性刚度比的增大,初始弹性模量 E_0 的结果呈现出减小的趋势,且不断逼近黏性刚度比 $\bar{k}^*$ 为零时的结果,即 1.98 GPa。推测 $x = 0$ 和 $y = 1.98$ 为颗粒黏性刚度比 $\bar{k}^*$ 非零情况所对应的函数系列的两条渐近线,拟合的关系表达式为:

$$E_0 = 2.76\bar{k}^{*-0.4} + 1.98 \quad (6)$$

Ⅲ类:对应力-应变曲线中各特征值均不敏感,如刚度比、摩擦系数等细观参数。

Ⅳ类:对试样破坏形式敏感,如摩擦角(见图 10、图 11)。

由图 10 可知,在本次细观参数取值范围内,试样中的接触破坏既有由张拉破坏导致的接触断裂,又有由剪切破坏导致的接触断裂。当摩擦角取值不同时,试样的破坏形式可以分为如下三种:

(1) 摩擦角取值 0° 、 45° 、 180° 、 225° 、 360° 时,颗粒间的接触属性均表现为受拉断裂,且断裂时应变量大。

(2) 摩擦角取值 135° 、 315° 时,颗粒间的接触属性均为受拉断裂,且断裂时应变量较小。

(3) 摩擦角取值 90° 、 270° 时,颗粒间的接触属性绝大部分表现为剪切破坏。此外,颗粒间的接触最先出现受剪断裂,并且断裂时应变极小。

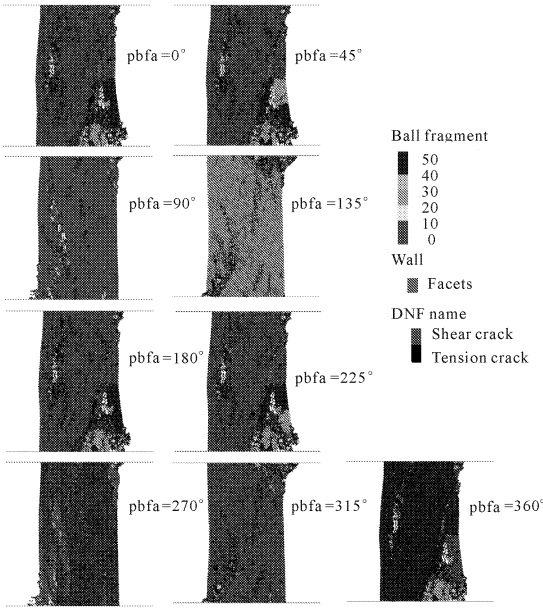


图 10 摩擦角不同取值下的试样破碎情况

单轴试验条件下试验发生破坏有两个关键性节点:一个是颗粒间的接触属性第一次发生破坏,即初始破坏;另一个是颗粒间的接触属性大面积发生破坏且相互贯通,此时试样承载能力突然减小,即瞬间断裂。下面分析颗粒间的接触属性在初始破坏和瞬间断裂时所对应的应变之间的关系。

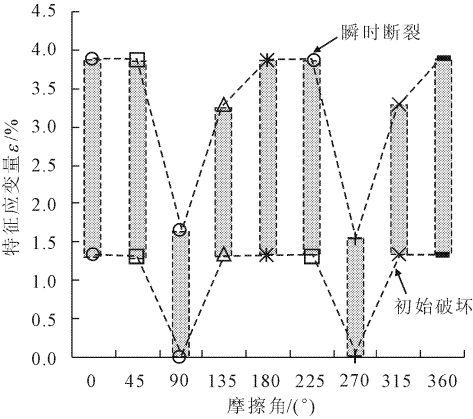


图 11 接触破坏突变值对应的试样应变量对比

由图 11 可知,总结如下几点规律:

(1) 从初始破坏到瞬间断裂所经历的应变差值不大,在本试验条件下其破坏过程的应变差值约为 $1.65\% \sim 2.54\%$ 。

(2) 随着摩擦角的增大,该破坏过程表现出一定的周期性,且周期为 180° 。

2 细观参数取值方法及验证

2.1 细观参数取值方法

根据上述不同细观参数对试样应力 - 应变曲线影响效果及特点,制定细观参数配选的思路见图 12。

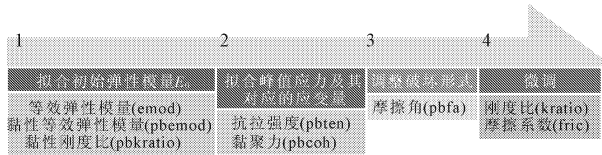


图 12 确定细观参数取值的思路

(1) 拟合初始弹性模量 E_0 。根据试验室岩石单轴试验所得初始弹性模量 E_0 ,即可确定等效模量的数量级。通常在没有其他参考条件的前提下,近似地取等效黏性弹性模量和等效模量的值相等。此外,结合非零的黏性刚度比与初始弹性模量 E_0 之间的数值关系,与等效模量(emod)以及黏性等效模量(pb-emod)相互配合可迅速确定Ⅱ类细观参数的取值,即可完成对应力 - 应变曲线中的初始弹性模量 E_0 的拟合。

(2) 拟合峰值应力及其对应的应变。在完成初始弹性模量 E_0 的拟合后,利用Ⅰ类细观参数对应力 - 应变曲线中的初始弹性模量 E_0 不敏感的特性,同时结合抗拉强度和黏聚力与应力峰值及其对应的应变量的数学关系,完成对应力 - 应变曲线的峰值及其对应的应变等特征值的拟合。此时,Ⅰ、Ⅱ类细观参数的取值基本确定,应力 - 应变曲线基本拟合完毕。

(3) 破坏模式调整。由于摩擦角对颗粒间接触属性破坏形式敏感,通过调试摩擦角的取值,调节试样的破坏形式。虽然相较于上一个参数调试步骤,此时所得模拟结果的应力 - 应变曲线会有轻微的改变,但是总体影响不大。

(4) 结果微调。为了弥补上一个拟合步骤所导致的轻微变化,可以通过调整刚度比和摩擦系数等Ⅳ类细观参数的取值,从而达到结果微调的目的。

2.2 实例验证

利用 2.1 节细观参数的选取方法,对砂岩岩石试样的细观参数进行拟定,具体取值见表 2。

室内砂岩单轴试验结果和本文细观参数取值条件下的 PFC 模拟结果进行对比,如图 13 所示(图 13 中室内试验数据引自文献[18])。

表 2 砂岩细观参数取值表

接触属性名称	取值
等效模量 E^*/GPa	2.0
黏性等效模量 $\bar{E}^*/\text{GPa}$	2.0
刚度比 k^*	1.0
黏性刚度比 $\bar{k}^*$	0.5
抗拉强度 $\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	7.0
摩擦系数 μ	0.5
黏聚力 $\bar{c}/\text{MPa}$	10
摩擦角 $\phi/(\circ)$	75

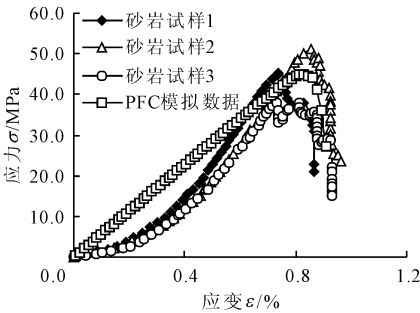
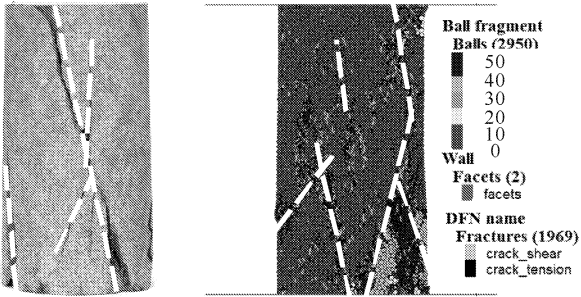


图 13 砂岩室内单轴试验和数值模拟的应力 - 应变曲线对比

由图 13 可知,试验室中的砂岩试样在压缩初期,其应力 - 应变曲线会出现先缓后陡的现象。一方面可能是砂岩试样受压后,其天然缝隙闭合的一个过程;另一方面也可能是砂岩试样由于制样过程导致的卸载回弹,而被再次压缩导致的。基于上述因素导致的初始弹性模量的不确定性,取岩石试样轴向应变为 1% 处的应力 - 应变曲线进行拟合确定。因此,在运用本方法确定的细观参数的基础上,对应力 - 应变曲线中的初始弹性模量 E_0 、应力峰值及其对应的应变等特征值的拟合效果均表现良好。

试样破坏形式的对照情况如图 14 所示(图中室内岩石破坏图像引自文献[18]):



(a) 室内试验破坏结果 (b) 数值模拟试验破坏结果

图 14 砂岩破坏形式的室内试验和数值模拟结果

本文细观参数取值条件下的 PFC^{2D}单轴试验模拟结果表明,裂缝开展的角度大约在 40° ~ 55° 范围,表现出拉、剪破坏相结合的断裂形式,与室内试验结

果相互吻合。

3 结 语

本文通过大量的试验模拟计算,研究线性平行粘结接触模型中的接触属性与应力-应变曲线特征量之间的数学关系,得到了以下结论:

(1) 根据线性平行粘结接触模型中的细观参数对应力-应变曲线特性以及试样破坏形式的影响情况,将细观参数分为四类:① 对峰值应力及其应变影响较敏感,但对初始弹性模量影响极小,如抗拉强度、黏聚力等细观参数;② 具有复合影响效果,对应力峰值和初始弹性模量 E_0 均为敏感,如等效模量、黏性等等效模量以及黏性刚度比等细观参数;③ 对应力-应变曲线的各特征值均不敏感,如刚度比、摩擦系数等细观参数;④ 对试样破坏形式敏感,如摩擦角。

(2) 以线性平行粘结接触模型中的细观参数对应力-应变曲线影响的特征为基础,结合试样破坏形式,制定的岩石细观参数的选取方法,能够较大程度上缩短初次确定岩石细观参数的时间,并且通过实例验证表明所得应力-应变曲线以及试样破坏模式等各方面的模拟效果均表现良好。

然而,本文提出的岩石类细观参数取值办法,虽然能在较大程度上缩短初次确定岩石细观参数的时间,但是,在细观参数取值过程中,由于具有复合影响效果的细观参数,如Ⅱ类细观参数,其宏细观参数之间具有极其复杂的物理力学关系,很难建立起统一的数学关系。本文在拟合Ⅱ类细观参数的过程中,采取化Ⅱ类复合型影响效果为单因素影响效果考虑的方式,必然会导致一定量的试算过程,无法做到一步到位。

参考文献:

- [1] Billiaux D, Dedecker F, Cundall P. A novel approach to studying rock damage: the three-dimensional adaptive continuum/discontinuum code[C]//Proceedings of Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, 2004:723-728.
- [2] 朱焕春, Andrieux Patrick, 钟辉亚. 节理岩体数值计算方法及其应用(二):工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 89-96.
- [3] 常晓林, 胡超, 马刚, 等. 模拟岩石失效全过程的连续-非连续变形体离散元方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2004-2011.
- [4] 曹琰波, 戴福初, 许冲, 等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2878-2887.
- [5] 王念秦, 汤廉超. 黄土崩塌灾害运动机理及其离散元数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 152-156.
- [6] 王涛, 陈晓玲, 杨建. 基于 3D GIS 和 3DEC 的地下洞室围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3476-3481.
- [7] 蒋明镜, 周雅萍, 朱方园, 等. 素混凝土桩复合地基承载机理的离散元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 1-7.
- [8] Huank H Y. Discrete element modeling of tool rock interaction[D]. Minnesota: University of Minnesota, 1999.
- [9] Nardin A, Schrefler B A. Modelling of cutting tool soil interaction part II: macromechanical model and upscaling[J]. Computer Mechanics, 2005, 36(5): 343-359.
- [10] Hsieh Y M, Li H H, Huang T H, et al. Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of sandstone affected by microscopic properties—revealed by bonded particle model[J]. Engineering Geology, 2008, 99(1/2): 1-10.
- [11] 徐金明, 谢芝蕾, 贾海涛. 石灰岩细观力学特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 390-395.
- [12] 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): 1031-1040.
- [13] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1491-1498.
- [14] 周健, 杨永香, 刘洋, 等. 循环荷载下砂土液化特性颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1083-1088.
- [15] 尹成薇, 梁冰, 姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏细观参数关系分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 264-267.
- [16] 徐小敏, 凌道盛, 陈云敏, 等. 基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(7): 991-998.
- [17] 曹智. 砂泥岩及其颗粒料力学特性 PFC 模拟方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [18] 王俊杰, 方绪顺, 邱珍锋, 等. 砂泥岩颗粒混合料工程特性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.