

基于颗粒流模型的灰岩材料宏、细观参数的试验研究^{*}

——以重庆市南川区甄子岩危岩为例

唐红梅, 宋 刚, 周福川, 杨 健
(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:针对采用颗粒流模型离散单元法模拟陡高边坡压裂型塔柱状危岩失稳动态演绎过程中危岩体下部劣化区和中上部非劣化区灰岩的细观参数快速准确标定的难点问题,以平行黏结本构模型为颗粒流的接触模型,构建基于正交设计的三维离散元单轴压缩试验,结合重庆市南川区甄子岩第二级陡崖的茅口组灰岩室内试验,通过灰色关联度、多因素方差和回归分析的相互验证,以获得灰岩 6 个主要细观参数与 3 个宏观参数之间的定量表达式。研究结果显示:灰岩的弹性模量与颗粒接触模量呈正相关线性增长,泊松比与颗粒刚度比呈对数增长,单轴抗压强度随平行黏结切向强度呈正相关线性增长。进一步构建了宏、细观参数之间的多元函数表达式,并提出灰岩材料细观参数标定流程,算例验证结果显示数值模拟试验结果与室内试验结果破坏模式、应力-应变曲线变化规律一致。所提出的方法可用于灰岩细观参数的快速标定,减少了试错法在细观参数标定过程中的盲目性和繁琐性,为该类型压裂座溃型危岩失稳解体的 PFC^{3D} 数值演绎提供了重要支撑。

关键词:颗粒流模型;正交设计;宏、细观参数;灰岩;灰关联

中图分类号:P642;TU45

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)04-0050-11

岩石是一种复杂的矿物集料,它的力学性能和损伤演化机理对于岩土工程的防灾减灾研究具有重要的理论意义和工程价值。离散单元法基于非连续介质理论建立刚性颗粒与岩石材料之间的力学联系,找到从细观角度探索岩石材料破坏机理的研究方向^[1-3]。因颗粒间作用的不确定性和复杂性缺乏相关理论依据,宏、细观参数间并非一一对应,繁多的参数与参数间的相互影响让细观参数的确定与校核成为离散单元法研究岩石材料的难题。因此建立宏、细观参数之间的相关关系式,对于指导细观参数的准确标定具有重大意义。

许多学者在颗粒流模型(particle flow code, PFC)中的宏、细观参数标定上做了有意义探索,例如:Castro-Filgueira 等人^[4]基于试错法结合灵敏度分析确定了宏观参数对应的主控细观参数,获得了花岗岩宏、细观参数之间的关系式;赵国彦等人^[5]基于平行粘结模型中定性宏、细观特性的理论公式,利用试错法结合理论分析和数值模拟,探讨了粉砂岩宏、细观参数之间的关系式并实例验证;陈鹏宇等人^[6]基于 PFC^{2D} 平直节理接触模型,利用正交设计提出了灰岩材料试错法标定细观参数的流程;丛宇等人^[7]基于正交设计探究宏、细观参数之间的定量相关性,分析了细观参数对宏观参数变化影响的规律性;阿比尔的等人^[8]基于平行粘结模型并采用控制变量法,较全面地分析了几何参数和其他变量参数对变形参数和强度参数的影响,发现了颗粒尺寸比(W/R_{max})大于 80 时岩石各强度参数趋于稳定的规律,并建立了宏、细观参数间的经验公式;Li 等人^[9]通过回归分析构建了宏、细观参数的对应关系式,定量确定 PFC^{3D} 模型的细观参数。此外,其他学者基于 PFC 并结合实验设计法对岩石宏、细观参数间相关关系进行分析,获得宏、细观参数的定量关系,优化了细观参数标定流程,在各种岩石的细观参数标定中取得了良好效果^[10-12]。然而,上述研究主要通过试错法或其他较单一方法来建立宏、细观参数之间的关系式,标定过程繁琐且具有盲目性,标定流程需进一步改进优化。鉴于针对重庆市南川区甄子岩陡崖危岩的茅口组灰岩材料的 PFC 研究成果罕见,本研究以这一灰岩材料为研究材料,以 PFC^{3D} 单轴压缩数值模拟试验作为宏观参数的测量方法,结合该灰岩室内单轴压缩实验结果,采用正交设计的试验方法,拟构建灰关联、多因素方差分析和回归分析的统计方法融合相互验证的细观参数标定方法,提出适用于该灰岩材料的细观参数标定

^{*} 收稿日期:2023-04-19 修回日期:2024-02-03 网络出版时间:2024-10-11T09:10

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51678097)

第一作者简介:唐红梅,女,教授,博士生导师,研究方向为岩土地质灾害减灾理论与防治技术,E-mail:hmtang6778@sina.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20241010.1930.004

流程,减少试错法在细观参数标定中的盲目性和繁琐性,为灰岩地区的陡高边坡压裂型塔柱状危岩 PFC^{3D} 失稳解体的动态演绎提供重要支撑。

1 数值模型与工况设计

1.1 细观参数与数值模型

颗粒流本构模型中细观参数的选取是 PFC6.0 软件进行数值模拟的关键。常用的接触本构模型有平行黏结模型和接触黏结模型。本研究中的灰岩材料采用平行黏结 PB 本构模型模拟脆性岩石材料^[8]。根据文献[13-14]确定的部分细观参数以及未确定的细观参数、宏观参数如表 1 所示。根据文献[3,15]做出如下假设:数值模拟中颗粒接触模量(E_c)与平行黏结模量($\bar{E}_c$)相同,颗粒刚度比(k_n/k_s)与平行黏结刚度比($\bar{k}_n/\bar{k}_s$)相同。

表 1 遴选的宏、细观参数
Tab. 1 Macro and mesoscopic parameters selected

已确定的细观参数	未确定的细观参数	宏观参数
半径乘子($\bar{\lambda}=1.0$)	颗粒接触模量(E_c)(单位:GPa)	弹性模量(E)(单位:GPa)
颗粒密度($2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	颗粒刚度比(k_n/k_s)	泊松比(ν)
颗粒半径比($R_{\max}/R_{\min}=1.66$)	颗粒摩擦系数(μ)	单轴抗压强度(σ_p)(单位:MPa)
颗粒最小半径($R_{\min}=0.8\text{ mm}$)	平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)(单位:MPa)	
颗粒最大半径($R_{\max}=1.328\text{ mm}$)	平行黏结切向强度($\bar{C}$)(单位:MPa)	
孔隙率(0.2)	平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)(单位: $^\circ$)	

如图 1 所示,用球颗粒构建标准圆柱体几何模型,岩石试样的高、直径分别为 100、50 mm。在数值模型中,颗粒将会在最小半径和最大半径之间随机生成,并利用半径放大法来对模型中的颗粒分布进行调节,一共生成 25 789 个颗粒球。通过建立上顶、下底的刚性运动“墙”模拟单轴压缩过程。

1.2 室内试验取样

室内试验所用岩样采自重庆市南川区甄子岩第二级陡崖塔柱状崩余危岩的劣化区与非劣化区茅口组灰岩材料(图 2)^[16],呈黑灰色,颗粒细小均匀。按照《工程岩体试验方法标准(GB/T 50266—2013)》,在将原岩经过取芯、分割、打磨等一系列加工工艺之后,得到高、直径分别为 100、50 mm 的标准圆柱体试件。室内单轴试验在重庆交通大学的 RMT-301 型电液伺服岩石力学试验机上完成。

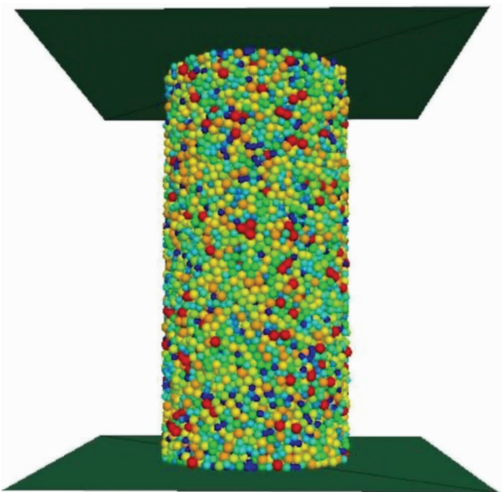
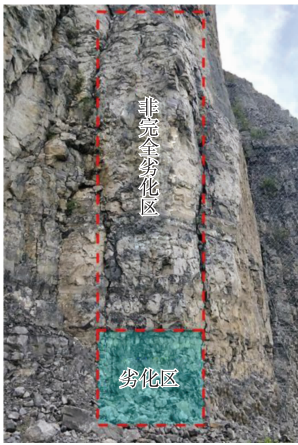
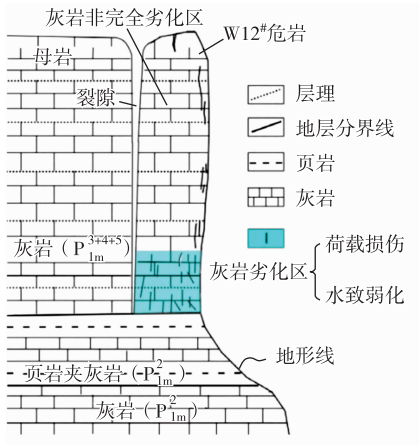


图 1 虚拟单轴压缩试验示意图
Fig. 1 Schematic diagram of virtual uniaxial compression test



a 地质模型图
b 实物图
图 2 甄子岩 W12[#] 危岩地质模型和试验岩样^[16]
Fig. 2 Geological model of Zeng Ziyan rock mass W12[#] unstable rock and the test sample^[16]

1.3 正交试验工况

正交试验是基于多因素多水平的试验方法,代表性的点具有“均匀分散、齐整可比”的特征,会大大降低试验

次数^[7,15]。依据现有文献对宏、细观参数的研究^[11,17],选取 6 个待标定细观参数,初步确定它们影响宏观模型力学性能的细观参数取值区间,设计 6 细观参数 5 水平正交试验方案,如表 2 所示:颗粒接触模量(E_c)为 20~40 GPa,颗粒刚度比(k_n/k_s)为 1.0~3.0,颗粒摩擦系数(μ)为 0.2~0.6,平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)为 20~100 MPa,平行黏结切向强度($\bar{C}$)为 10~30 MPa,平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)为 5°~25°。

表 2 细观参数正交试验设计表

Tab. 2 Orthogonal experimental design table of meso-parameters

工况编号	颗粒接触模量 (E_c)/GPa	颗粒刚度比 (k_n/k_s)	颗粒摩擦系数 (μ)	平行黏结法向强度 ($\bar{\sigma}_c$)/MPa	平行黏结切向强度 ($\bar{C}$)/MPa	平行黏结摩擦角 ($\bar{\varphi}$)
1	20	1.0	0.2	20	10	5°
2	25	1.5	0.3	40	15	10°
3	30	2.0	0.4	60	20	15°
4	35	2.5	0.5	80	25	20°
5	40	3.0	0.6	100	30	25°

本次正交表由 SPSS 25.0 软件自动生成,对 $L_{25}(5^6)$ 正交表所列 25 组工况进行三维单轴压缩数值试验,得到相应的宏观参数数值模拟结果,如表 3 所示:弹性模量(E)的范围为 28.1~71.9 GPa,平均值为 46.91 GPa;泊松比(ν)的范围为 0.083~0.257,平均值为 0.191(此处各工况的弹性模量(E)采用应力-应变曲线上极限强度 50%点的侧应变与轴应变之比);单轴抗压强度(σ_p)的范围为 22.57~139.77 MPa,平均值为 67.24 MPa。

2 宏、细观参数关系分析

2.1 主控细观参数定性研究

2.1.1 灰关联分析

灰关联分析模型中不同序列之间的联系紧密度是判断不同序列曲线几何形状的相似程度的依据^[18]。宏观因变量特征的序列记为 $\{x_0(t)\}$,细观自变量序列记为 $\{x_i(t)\}$ 。序列 $\{x_0(t)\}$ 与序列 $\{x_i(t)\}$ 各点在 k 时刻的关联系数 ξ_{0i} 可由下式算出^[19]:

$$\xi_{0i} = \frac{\min_i(\min_k |x_0(k) - x_i(k)|) + \rho \max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)}, \quad (1)$$

其中: $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 k 时刻 2 个序列的绝对差值, $\min_i(\min_k |x_0(k) - x_i(k)|)$ 为 k 时刻绝对差值的最小值; $\max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)$ 为 k 时刻绝对差值的最大值; ρ 为分辨系数,它的值一般在 0~1 之间,通常取 0.5^[20]。

2 个序列的关联度用两序列各时刻关联系数的平均值计算,具体如下:

$$R_{0i} = \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) / N, \quad (2)$$

其中: R_{0i} 为 $\{x_i(t)\}$ 与 $\{x_0(t)\}$ 的灰关联度; N 为数据的个数。

由于自变量细观参数与因变量宏观参数之间不存在时间序列,故可将式(2)简化为:

$$R_{0i} = \sum_{k=1}^N \xi_{0i} / N。$$

由于每个因素的物理含义都不同,因此得到的数据维度也不同。在进行灰关联分析的时候,采用均值化方法,必须先将数据进行预处理,主要计算步骤为:1) 将表 3 中宏、细观参数各列数据除以各列的平均值,得到的新数据量纲均为 1;2) 将新数据代入式(1),分别可得宏观参数(参考序列)与细观参数(比较序列)的关联系数;3) 利用式(3)获取各宏观参数与细观参数间的关联度,结果如表 4 所示。

根据灰关联理论,按照关联度大小对将表 4 中的细观参数进行排序,发现弹性模量(E)主要受控于颗粒接触模量(E_c),两者关联度为 0.925;泊松比(ν)与刚度比(k_n/k_s)的关联度最高达 0.86,泊松比(ν)与颗粒摩擦系数(μ)的关联度次之为 0.75;单轴抗压强度(σ_p)与平行黏结切向强度($\bar{C}$)的关联度最高,达 0.839;此外,平行黏结

摩擦角($\bar{\varphi}$)与 3 个宏观参数的关联度均较小。总体上看,颗粒接触模量(E_c)为弹性模量(E)的主控细观参数,颗粒刚度比(k_n/k_s)和颗粒摩擦系数(μ)为泊松比(ν)的主要影响因素,而平行黏结切向强度($\bar{C}$)为单轴抗压强度(σ_p)主要影响因素。

表 3 正交试验工况及宏观参数数值模拟试验结果
Tab.3 Orthogonal test conditions and numerical simulation results of macroscopic parameters

工况编号	细观参数(自变量)						宏观参数(因变量)		
	颗粒接触模量(E_c)/GPa	颗粒刚度比(k_n/k_s)	颗粒摩擦系数(μ)	平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)/MPa	平行黏结切向强度($\bar{C}$)/MPa	平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)	弹性模量(E)/GPa	泊松比(ν)	单轴抗压强度(σ_p)/MPa
1	20	1.0	0.2	20	10	25°	37.0	0.108	22.57
2	20	1.5	0.3	80	30	5°	32.6	0.171	86.35
3	20	2.0	0.4	40	25	10°	30.6	0.206	82.47
4	20	2.5	0.5	100	20	15°	29.7	0.244	88.92
5	20	3.0	0.6	60	15	20°	28.1	0.254	71.02
6	25	1.0	0.2	80	20	20°	44.6	0.083	50.67
7	25	1.5	0.3	40	15	25°	40.4	0.179	43.10
8	25	2.0	0.4	100	10	5°	38.4	0.197	37.67
9	25	2.5	0.5	60	30	10°	36.8	0.230	116.04
10	25	3.0	0.6	20	25	15°	35.0	0.231	68.96
11	30	1.0	0.2	40	30	15°	54.1	0.131	70.53
12	30	1.5	0.3	100	25	20°	47.8	0.180	82.2
13	30	2.0	0.4	60	20	25°	45.1	0.214	71.07
14	30	2.5	0.5	20	15	5°	43.7	0.220	53.96
15	30	3.0	0.6	80	10	10°	41.5	0.257	51.56
16	35	1.0	0.2	100	15	10°	61.8	0.108	35.67
17	35	1.5	0.3	60	10	15°	57.5	0.158	32.60
18	35	2.0	0.4	20	30	20°	52.5	0.208	70.56
19	35	2.5	0.5	80	25	25°	51.2	0.222	104.97
20	35	3.0	0.6	40	20	5°	49.4	0.250	85.12
21	40	1.0	0.2	60	25	5°	71.9	0.125	56.76
22	40	1.5	0.3	20	20	10°	64.8	0.181	55.42
23	40	2.0	0.4	80	15	15°	61.8	0.192	58.46
24	40	2.5	0.5	40	10	20°	59.3	0.201	44.66
25	40	3.0	0.6	100	30	25°	57.1	0.227	139.77

表 4 关联度结果
Tab.4 The correlation results

宏观参数	细观参数					
	颗粒接触模量(E_c)	颗粒刚度比(k_n/k_s)	颗粒摩擦系数(μ)	平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)	平行黏结切向强度($\bar{C}$)	平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)
弹性模量(E)	0.925	0.68	0.65	0.653	0.697	0.569
泊松比(ν)	0.738	0.86	0.75	0.656	0.704	0.576
单轴抗压强度(σ_p)	0.751	0.78	0.72	0.739	0.839	0.636

2.1.2 多因素方差分析

为了检验灰关联分析法的精度,采用 SPSS 25.0 统计软件考虑各因素的主效应进行方差分析(F 检验),分析表 3 中细观参数对宏观参数的影响程度;该统计软件将自动计算出 F 统计量与相伴概率 p 值。 F 统计量可用于判断并选取宏观参数的主控细观参数,采用相对 F 统计量(f_i)表征细观参数对宏观参数的影响程度,计算公式为^[21]:

$$f_i = F_i / \sum_{i=1}^m F_i, \quad (4)$$

在式(4)中: F_i 为第 i 个细观参数的 F 统计量; m 为细观参数总个数。 p 值用于直观检验各细观参数对宏观参数的影响程度是否具有统计学意义,本研究中当 $p < 0.05$ 时,有关统计结果具有统计学意义。

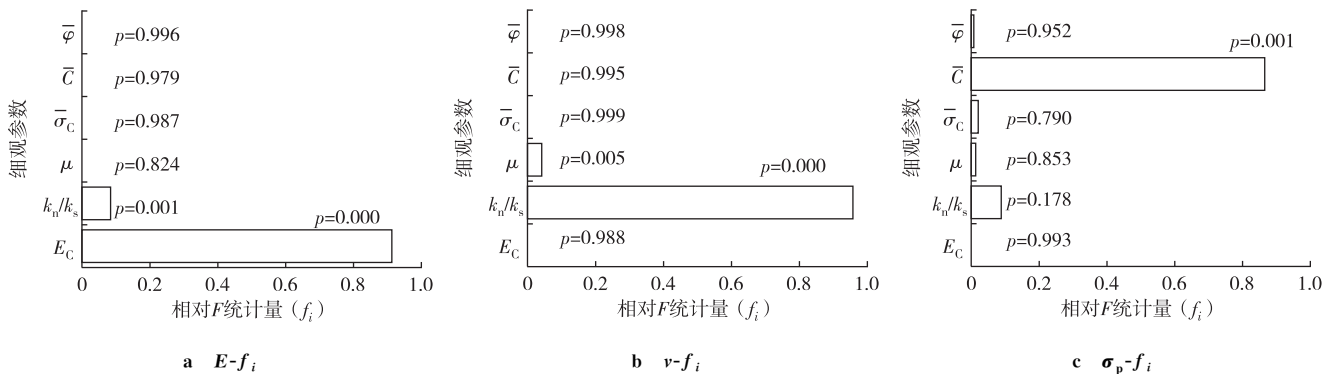
由图 3 可知,对各宏观参数具有统计学意义影响的细观参数如下:

1) 细观参数颗粒接触模量(E_c)和颗粒刚度比(k_n/k_s)对灰岩的宏观参数弹性模量(E)在 $p < 0.01$ 水平上有统计学意义上的影响,其他细观参数的相对 F 统计量特别大,因此可忽略其他因素对弹性模量(E)的影响。对比颗粒接触模量(E_c)和颗粒刚度比(k_n/k_s)的相对 F 统计量,发现颗粒刚度比(k_n/k_s)对宏观参数弹性模量(E)的影响程度相对较小,故可认为灰岩宏观参数弹性模量(E)的主控因素为细观参数颗粒接触模量(E_c)。

2) 细观参数颗粒刚度比(k_n/k_s)和颗粒摩擦系数(μ)对灰岩的宏观参数泊松比(ν)在 $p < 0.05$ 水平上有统计学意义上的影响,而其他细观参数对宏观参数泊松比(ν)的影响无统计学意义,故可加以忽略。颗粒摩擦系数(μ)的相对 F 统计量要远小于颗粒刚度比(k_n/k_s)的相对 F 统计量,因此可认为宏观参数泊松比(ν)的主控因素为细观参数颗粒刚度比(k_n/k_s)。

3) 细观参数平行黏结切向强度($\bar{C}$)对灰岩的宏观参数单轴抗压强度(σ_p)在 $p < 0.01$ 水平上有统计学意义上的影响,且它的相对 F 统计量足够小,因此宏观参数的单轴抗压强度(σ_p)的主控因素为细观参数平行黏结切向强度($\bar{C}$)。

综上所述,多因素方差分析与灰关联分析的结果基本一致,可见本研究遴选的主控细观参数具备较高可靠性。



注:各细观参数的中文名称见表 1。

图 3 多因素方差分析的相对 F 统计量

Fig. 3 Relative F statistic of multivariate ANOVA

2.2 宏、细观参数定量关系研究

2.2.1 单因素分析

对正交试验的结果进行回归分析,可获得宏观参数与主控细观参数间的定量关系。以颗粒接触模量(E_c)为例,采用控制变量法对宏观参数的主控细观参数进行单因素分析,具体步骤为:保持其他细观参数不变,将颗粒接触模量(E_c)从 20 GPa 等间距逐级增加到 80 GPa,间距为 10 GPa;输入三维数值模型中进行计算,得到颗粒接触模量(E_c)的单因素回归分析结果(表 5),弹性模量(E)与颗粒接触模量(E_c)的线性拟合结果见图 4a。同理,将颗粒刚度比(k_n/k_s)以 0.5 的间距从 1.0 等间距逐级增加到 4.5,得到泊松比(ν)与颗粒刚度比(k_n/k_s)的线性拟合结果(图 4b);将平行黏结切向强度($\bar{C}$)以 5 MPa 间距从 10 MPa 等间距逐级增加到 45 MPa,得到平行黏结切向强度($\bar{C}$)与单轴抗压强度(σ_p)的线性拟合结果(图 4c)。

表5 单因素分析试验结果
Tab.5 Single factor analysis test results

工况编号	自变量	因变量			不变量				
	颗粒接触模量 (E_c)/GPa	弹性模量 (E)/GPa	泊松比(ν)	单轴抗压强度 (σ_p)/MPa	刚度比 (k_n/k_s)	颗粒摩擦系数(μ)	平行黏结法向强度 ($\bar{\sigma}_c$)/MPa	平行黏结切向强度 ($\bar{C}$)/MPa	平行黏结摩擦角 ($\bar{\varphi}$)
1	10	15.3	0.220	72.49					
2	20	30.8	0.205	74.62					
3	30	45.7	0.217	75.51					
4	40	60.9	0.212	75.56					
5	50	75.4	0.199	75.19	2.0	0.4	60	20	10°
6	60	91.8	0.207	76.77					
7	70	106.6	0.208	76.26					
8	80	121.7	0.207	76.69					

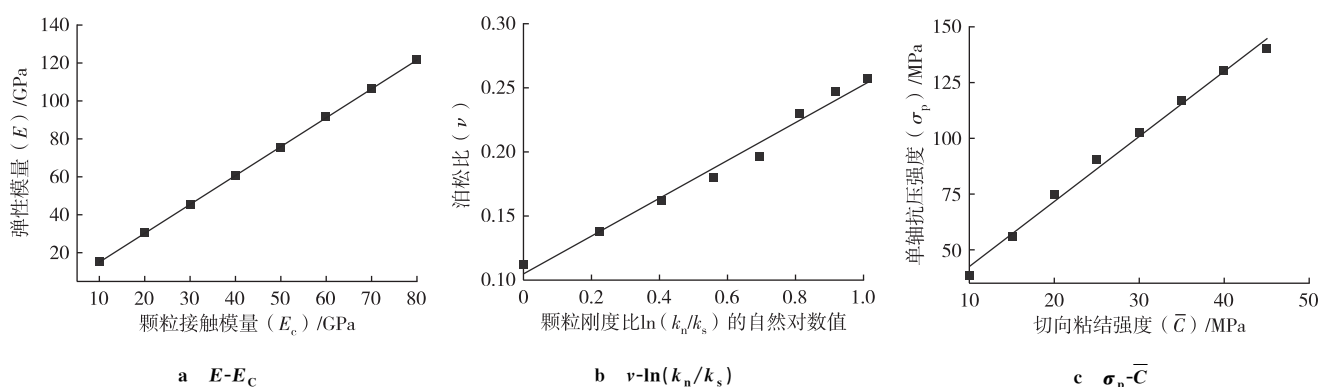


图4 宏观参数与主控细观参数的变化规律

Fig.4 Changes of macroscopic parameters and mesoscopic parameters

由图4可以得到灰岩材料的宏观参数弹性模量(E)、泊松比(ν)和单轴抗压强度(σ_p)分别与它们各自的主控细观参数颗粒接触模量(E_c)、颗粒刚度比(k_n/k_s)和平行黏结切向强度($\bar{C}$)的一元拟合公式:

$$E = 0.136 + 1.519E_c, R^2 = 0.999, \quad (5)$$

$$\nu = 0.105 + 0.147\ln(k_n/k_s), R^2 = 0.983, \quad (6)$$

$$\sigma_p = 13.582 + 2.905\bar{C}, R^2 = 0.993. \quad (7)$$

分析式(5)~(7)可以看出:弹性模量(E)与颗粒接触模量(E_c)呈正相关线性增长、泊松比(ν)与颗粒刚度比(k_n/k_s)呈对数增长、单轴抗压强度(σ_p)与平行黏结切向强度($\bar{C}$)呈正相关线性增长。

2.2.2 多因素分析

式(5)~(7)是单因素宏、细观参数分析结果,而实际上灰岩的宏观参数会受各细观参数间相互作用的影响。结合单因素分析表达式和数值试验结果,把灰岩材料3个宏观参数弹性模量(E)、泊松比(ν)和单轴抗压强度(σ_p)与6个细观参数颗粒接触模量(E_c)、颗粒刚度比(k_n/k_s)、颗粒摩擦系数(μ)、平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)、平行黏结切向强度($\bar{C}$)和平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)进行重新拟合,得到多元非线性拟合式如下:

$$E = 3.161 + 1.572E_c - 38.265\ln(k_n/k_s) + 17\mu + 0.208\bar{\sigma}_c - 0.02\bar{C} + 0.702\bar{\varphi}, R^2 = 0.995, \quad (8)$$

$$\nu = 0.156 + 0.405\ln(k_n/k_s) - 0.574\mu, R^2 = 0.949, \quad (9)$$

$$\sigma_p = -33.79 + 20.08E_c + 33.62\ln(k_n/k_s) + 54.33\mu + 0.39\bar{\sigma}_c + 2.89\bar{C} + 2.11\bar{\varphi}, R^2 = 0.917. \quad (10)$$

根据式(5)~(10)可得如下细观参数表达式:

$$E_c = 0.658E - 0.0895, \quad (11)$$

$$k_n/k_s = \exp(6.803\nu - 0.714), \quad (12)$$

$$\bar{C} = 0.344\sigma_p - 4.675, \quad (13)$$

$$\mu = 3.06\nu - 0.232, \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_c = -0.06E - 125.207\nu + 0.389\sigma_p + 60.722, \quad (15)$$

$$\bar{\varphi} = 0.036E + 63.909\nu + 0.306\sigma_p + 30.754. \quad (16)$$

其中:颗粒接触模量(E_c)与弹性模量(E)呈线性增长,颗粒刚度比(k_n/k_s)与泊松比(ν)呈指数增长,平行黏结切向强度($\bar{C}$)与单轴抗压强度(σ_p)呈线性增长,颗粒摩擦系数(μ)与泊松比(ν)呈线性增长;平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)、平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)与 3 个宏观参数呈多元非线性关系。

3 细观参数标定方法与应用

3.1 细观参数标定流程

根据前文的分析以及宏、细观参数之间的定量关系可对细观参数进行标定,通过式(11)~(16)确定各细观参数的初值,利用试错法标定细观参数的流程图如图 5 所示。

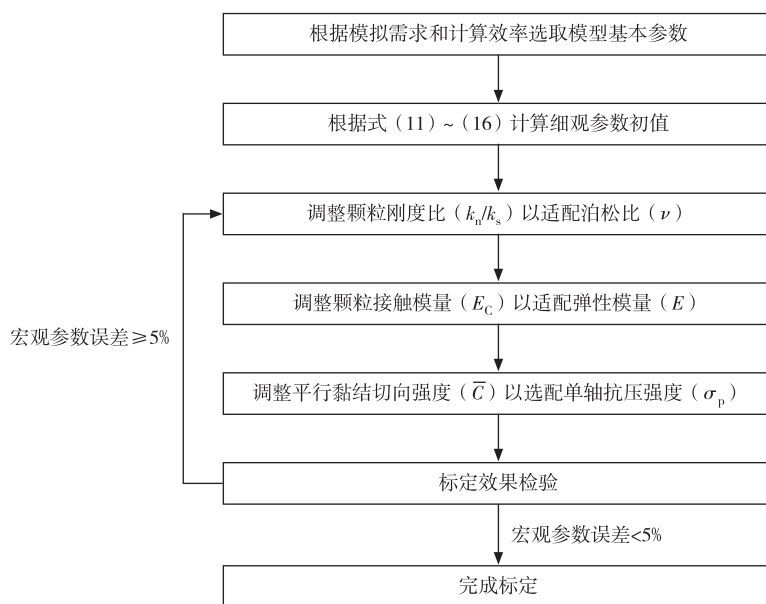


图 5 细观参数标定流程图

Fig. 5 Flow chart of mesoscopic parameter calibration

3.2 灰岩室内试验验证

为验证上述方法标定细观参数的可行性,将灰岩室内单轴压缩试验结果和数值模拟结果进行对比。对危岩非劣化区和劣化区的岩样进行多组平行试验,剔除离散性较大的试验数据,得到室内试验宏观参数的结果;再根据公式(11)~(16)计算得到细观参数初始值(表 6)。

按照图 5 的标定流程,以灰岩塔柱状危岩的非劣化区为例,总共有以下 4 个步骤(表 7):

1) 据式(11)~(16),计算各细观参数初值,将计算结果赋予数值模型进行模拟试验,得到弹性模量(E)为 30.47 GPa,泊松比(ν)为 0.188,单轴抗压强度(σ_p)为 96.87 MPa;该结果与目标值较接近,误差均不超过 7%,但与目标仍有差距,还需对细观参数进行微调整。

2) 通过式(12)对数值模型的颗粒刚度比(k_n/k_s)进行微调,调整后颗粒刚度比(k_n/k_s)为 2.140,获得的弹性模量(E)为 30.41 GPa,泊松比(ν)为 0.196,单轴抗压强度(σ_p)为 98.09 MPa。泊松比(ν)的数值模拟结果与目标值的误差仅为 1.51%,满足要求;颗粒刚度比(k_n/k_s)不再进行调整。

3) 根据式(11)对数值模型的颗粒接触模量(E_c)进行微调,调整后颗粒接触模量(E_c)为 19.5 GPa,再开展单轴压缩数值试验,获得弹性模量(E)为 29.18 GPa,泊松比(ν)为 0.196,单轴抗压强度(σ_p)为 99.01 MPa,弹性模量(E)的数值模拟结果与目标值的误差仅为 2.47%,满足要求;颗粒接触模量(E_c)不再进行调整。

4) 依据式(13)对数值模型的平行黏结切向强度($\bar{C}$)进行微调。首先选取颗粒摩擦系数(μ)为 0.368,且 4 个步骤中始终未调整,得到弹性模量(E)为 29.18 GPa,泊松比(ν)为 0.196,单轴抗压强度(σ_p)为 89.12 MPa,调整后平行黏结切向强度($\bar{C}$)为 25.98 MPa,其模拟结果与目标值的误差仅为 1.96%,满足要求;平行黏结切向强度($\bar{C}$)不再进行调整。

上述细观参数标定过程总共进行了 4 次单轴压缩试验,非劣化区岩石试样与目标值的误差最大不超过 2.47%,表明标定方法较可靠。

表 6 细观参数标定过程及宏观参数模拟结果
Tab. 6 Mesoscopic parameter calibration process and macro parameter simulation results

数值来源	岩样区域	细观参数						宏观参数		
		颗粒接触模量 (E_c)/GPa	颗粒刚度比 (k_n/k_s)	颗粒摩擦系数(μ)	平行黏结法向强度 ($\bar{\sigma}_c$)/MPa	平行黏结切向强度 ($\bar{C}$)/MPa	平行黏结摩擦角 ($\bar{\varphi}$)	弹性模量 (E)/GPa	泊松比(ν)	单轴抗压强度 (σ_p)/MPa
室内试验	劣化区							22.61	0.236	78.66
	非劣化区							29.92	0.199	90.90
拟合公式计算值(初值)	劣化区	14.79	2.44	0.49	60.39	22.38	22.60°			
	非劣化区	19.60	1.90	0.38	69.34	26.59	16.75°			
细观参数调整优化	劣化区	15.90	2.76	0.49	60.39	18.80	22.60°	23.21 (2.65%)	0.233 (1.69%)	77.82 (1.12%)
	非劣化区	19.50	2.10	0.38	69.34	24.05	16.75°	29.18 (2.47%)	0.196 (1.51%)	89.12 (1.96%)

注:括号内数据为宏观参数误差,它的计算方式为室内试验结果与数值模拟结果之差的绝对值除以室内试验结果,再乘以 100%。

表 7 非劣化区宏观参数模拟值和标定过程
Tab. 7 Macro parameter simulation value and calibration process in non-degraded zone

步骤	数值模拟宏观参数			细观参数					
	弹性模量 (E)/GPa	泊松比 (ν)	单轴抗压强度 (σ_p)/MPa	颗粒接触模量 (E_c)/GPa	颗粒刚度比 (k_n/k_s) _s	颗粒摩擦系数(μ)	平行黏结法向强度 ($\bar{\sigma}_c$)/MPa	平行黏结切向强度 ($\bar{C}$)/MPa	平行黏结摩擦角 ($\bar{\varphi}$)
1)	30.47	0.188	96.87	19.6	1.896	0.368	69.34	26.59	16.75°
2)	30.41	0.196	98.09	19.6	2.140	0.368	69.34	26.59	16.75°
3)	29.18	0.196	99.01	19.5	2.140	0.368	69.34	26.59	16.75°
4)	29.18	0.196	89.12	19.5	2.140	0.368	69.34	25.98	16.75°

同样地,灰岩塔柱状危岩的劣化区的细观参数标定过程同上,细观参数的计算值和对应的宏观参数的数值模拟值、宏观参数模拟值与室内试验值误差见表 6。

由图 6 可知:室内试验和数值模拟所获取的应力-应变曲线变化规律相符,由此标定的细观参数获得的灰岩宏观参数与物理力学试验参数基本一致,因此进一步验证了所提细观参数标定方法的合理性。此外,由于 PFC 生成时无初始裂隙,致使应力-应变曲线中无微裂隙闭合阶段,由此导致数值模拟与室内试验的应力-应变曲线之间存在一定偏差^[21-22]。

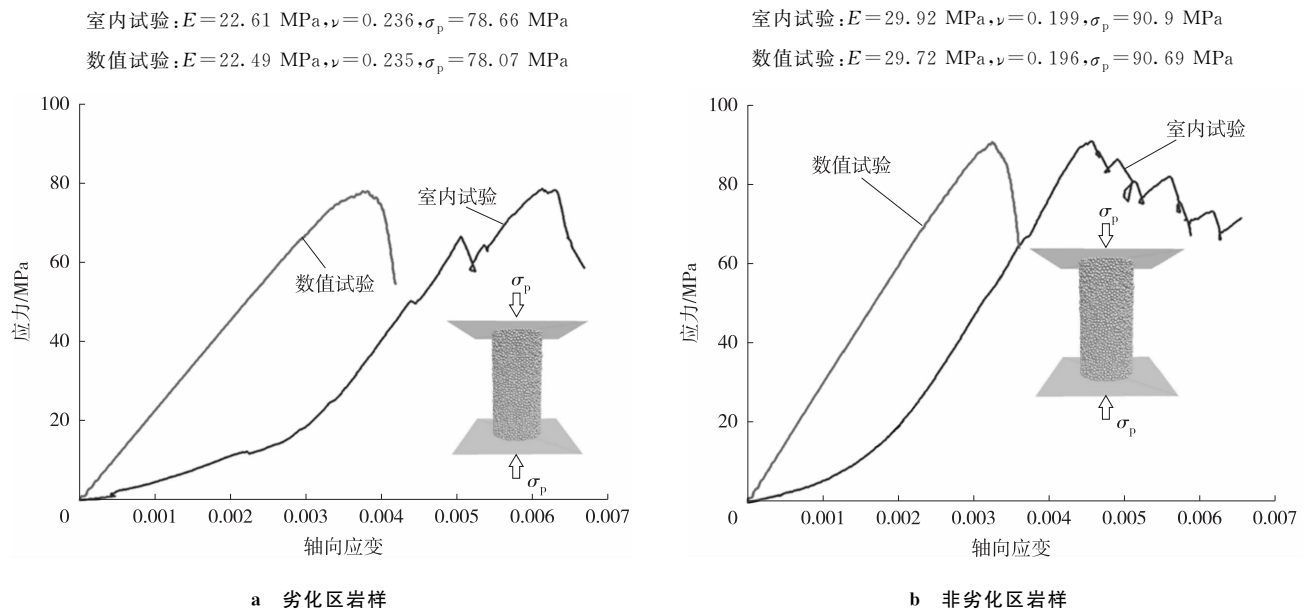


图 6 单轴压缩应力-应变曲线
 Fig. 6 Stress-strain curves of uniaxial compression

4 结束语

本研究为开展重庆市南川区甄子岩塔柱状危岩压裂解体机制的 PFC^{3D} 的动态演绎,进行了该危岩下部劣化区和中上部非劣化区的细观参数标定,根据平行黏结模型建立 PFC^{3D} 单轴压缩数值模型,选取颗粒接触模量(E_c)、刚度比(k_n/k_s)、颗粒摩擦系数(μ)、平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)、平行黏结切向强度($\bar{C}$)和平行黏结摩擦角($\bar{\varphi}$)共 6 个细观参数开展正交试验,对比数值模拟与室内岩石单轴试验结果,探究这 6 个细观参数与弹性模量(E)、泊松比(ν)和单轴抗压强度(σ_p)共 3 个宏观参数之间的力学响应关系,主要结果如下:

1) 正交试验结果显示,可用平行黏结模型模拟灰岩材料,对试验结果采取灰关联分析和多因素方差分析相互验证的分析方法,获得各个细观参数和宏观参数之间的定性关系,并确定 3 个宏观参数对应的主控细观参数。

2) 基于宏、细观参数之间的定性关系,采用单因素分析方法,得到主控细观参数与宏观参数之间的定量关系:弹性模量(E)与颗粒接触模量(E_c)呈正相关线性增长、泊松比(ν)与颗粒刚度比(k_n/k_s)呈对数增长、单轴抗压强度(σ_p)与平行黏结切向强度($\bar{C}$)呈正相关线性增长,并建立了宏、细观参数之间的多元函数关系表达式。

3) 提出了灰岩材料细观参数标定流程,以重庆市南川区甄子岩危岩灰岩材料为细观参数标定依据,使用调整后的细观参数进行数值模拟试验,结果显示数值模拟的宏观力学响应满足实际测试要求,且数值模拟试验和室内试验的强度参数与变形参数的最大误差均在 5% 以内,验证了本研究针对灰岩材料提出的细观参数标定方法的可行性。

综上所述,本研究所提出的方法可用于灰岩细观参数的快速标定,可减少试错法在细观参数标定过程的盲目性和繁琐性,为该类型压裂座落型危岩失稳解体的 PFC^{3D} 数值演绎提供了重要支撑。

参考文献:

- [1] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large scale movements in block rock systems[C]//Proceedings of the International Society of Rock Mechanics, Nancy: the International Society of Rock Mechanics, 1971, 2(8): 129-136.
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [3] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [4] CASTRO-FILGUEIRA U, ALEJANO L R, ARZÚA J, et al. Sensitivity analysis of the micro-parameters used in a PFC analysis

- towards the mechanical properties of rocks[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 191: 488-495.
- [5] 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.
ZHAO G Y, DAI B, MA C, et al. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1491-1498.
- [6] 陈鹏宇,孔莹,余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(5): 1240-1249.
CHEN P Y, KONG Y, YU H M. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(5): 1240-1249.
- [7] 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.
CONG Y, WANG Z Q, ZHEN Y R, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1031-1040.
- [8] 阿比尔的,郑颖人,冯夏庭,等. 平行黏结模型宏细观力学参数相关性研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1289-1301.
ABIERDI, ZHEN Y R, FENG X T, et al. Relationship between particle micro and macro mechanical parameters of parallel-bond model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1289-1301.
- [9] LI Z, RAO Q H. Quantitative determination of PFC^{3D} microscopic parameters[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(3): 911-925.
- [10] 谭攀,饶秋华,李卓,等. 考虑断裂韧度的 PFC^{3D} 细观参数标定新方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2849-2866.
TAN P, RAO Q H, LI Z, et al. A new method for quantitative determination of PFC^{3D} microscopic parameters considering fracture toughness[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2849-2866.
- [11] YOON J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 871-889.
- [12] 邓树新,郑永来,冯利坡,等. 试验设计法在硬岩 PFC^{3D} 模型细观参数标定中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 655-664.
DENG S X, ZHEN Y L, FENG L P, et al. Application of design of experiments in microscopic parameter calibration for hard rocks of PFC^{3D} model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 655-664.
- [13] 唐红梅,延兆奇,陈洪凯. 三峡水库岸坡崩坡堆积物力学特性数值试验研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(5): 42-49.
TANG H M, YAN Z Q, CHEN H K. Numerical test of colluvium's mechanical properties in Three Gorges Reservoir based on discrete element method[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2016, 33(5): 42-49.
- [14] 夏明,赵崇斌. 簇平行黏结模型中微观参数对宏观参数影响的量纲研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2): 327-338.
XIA M, ZHAO C B. Dimensional analysis of effects of microscopic parameters on macroscopic parameters for clump parallel-bond model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(2): 327-338.
- [15] POULSEN B A, ADHIKARY D P. A numerical study of the scale effect in coal strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 63: 62-71.
- [16] 周福川,唐红梅,王林峰. 缓倾角塔柱状危岩压裂损伤-突变失稳预测[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5): 1341-1352.
ZHOU F C, TANG H M, WANG L F. Catastrophe prediction of compression-induced fracturing and failure for a tower-shaped unstable rock mass with gentle dip angle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5): 1341-1352.
- [17] LI B, GONG W P, TANG H M, et al. Probabilistic analysis of a discrete element modelling of the runout behavior of the Jiweishan landslide[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, 45(8): 1120-1138.
- [18] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 2041-2046.
LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [19] 冯忠居,朱彦名,高雪池,等. 基于熵权-灰关联法的岩质开挖边坡安全评价模型[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(2): 55-65.
FENG J Z, ZHU Y M, GAO X C, et al. Safety evaluation model of excavating rock slope based on entropy-grey correlation method[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(2): 55-65.
- [20] 钱隼驰,仇蕾. 灰色关联分析中分辨系数取值的定量研究[J]. *统计与决策*, 2019, 35(10): 10-14.
QIAN S C, QIU L. Quantitative study on value of distinguishing coefficient in grey correlation analysis[J]. *Statistics and Decision*, 2020, 20(2): 55-65.
- [21] 陈鹏宇. PFC^{2D} 模拟裂隙岩石裂纹扩展特征的研究现状[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 528-539.
CHEN P Y. Research progress on PFC^{2D} simulation of crack propagation characteristics of cracked rock[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 528-539.

[22] 牛林新,辛酉阳. 基于正交设计的颗粒流模型宏观观参数相关分析:以岩石单轴压缩数值试验为例[J]. 人民长江,2015,46(16):53-57.

NIU X L, XIN Y Y. Analysis on relationship between macro-parameters and micro-parameters in PFC^{2D} model based on orthogonal design:case of rock uniaxial compression numerical test[J]. Yangtze River,2015,46(16):53-57.

Numerical Experimental Study on Mesoscopic Parameter Calibration of Limestone: Taking Zeng Ziyan Rock Mass Unstable Rock in Nanchuan District, Chongqing Municipality as an Example

TANG Hongmei, SONG Gang, ZHOU Fuchuan, YANG Jian

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The problem of fast and accurate calibration of mesoscale parameters in the lower degraded area and the upper non-degraded area of fractured tower column unstable rock in the process of dynamic calculation of instability of fractured tower column with high slope using particle flow code (PFC) discrete element method is discussed. Taking the parallel bond constitutive model as the contact model of particle flow, a three-dimensional discrete element uniaxial compression test based on orthogonal design was constructed. Combined with the laboratory test of Maokou Formation limestone in the second-order cliffs of the Zengziyan rock, Nanchuan District, Chongqing Municipality, the grey correlation degree, multi-factor variance and regression analysis were mutually verified. The quantitative expressions between six main mesoscopic parameters and three macroscopic parameters of limestone are obtained. The elastic modulus of limestone increased linearly with the contact modulus of particles, and poisson's ratio and the particle stiffness ratio increased logarithmically. The uniaxial compressive strength increases linearly with tangential bond strength, and there are multiple function expressions between macro and meso parameters. Furthermore, the multivariate function expressions between macroscopic and microscopic parameters of limestone materials are constructed. According to this, the calibration process of mesoscale parameters of limestone materials is proposed. The numerical simulation results are consistent with the experimental results in terms of failure mode and stress-strain curve. This method can be used for rapid calibration of the mesoscopic parameters of this limestone, reducing the blind complexity of "trial and error method" in the mesoscopic parameter calibration process, and providing important support for the numerical deduction of PFC for the instability and disintegration of this type of fractured rock.

Keywords: particle flow code; orthogonal design; macroscopic and microscopic parameters; limestone; grey correlation

特约稿作者介绍



唐红梅,女,研究员,博士,博士生导师,1988年毕业于重庆师范学院地理系。长期从事中国中西部地区地质灾害(如危岩崩塌、边坡及泥石流)减灾理论与防治技术研究,作为项目负责人获得国家自然科学基金面上项目3次资助研究,获得重庆市重点自然科学基金2次资助研究,作为主研参加多项国家重点研发项目如“973”项目、国家“十五”攻关项目、国际合作的春晖计划项目、国家的重大西部项目等。获得省部级科学进步一等奖项2项,教育部科技进步二等奖项1项,省部级二等奖项5项等多项奖励。在SCI/EI及中文核心期刊发表科技论文150余篇,出版专著7部。成功获得发明专利近30余项。



1954-2024
重庆师范大学70周年校庆
弦歌七秩 桃李芬芳