

冷德明, 史文兵, 李 华, 等. 表层喀斯特带溶蚀岩体单轴压缩力学特性模拟研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1258-1269.
DOI: 10.11932/karst2023y015

表层喀斯特带溶蚀岩体单轴压缩力学特性模拟研究

冷德明^{1,3}, 史文兵^{2,3}, 李 华¹, 梁 风^{2,3}

(1. 贵州大学 教育部喀斯特地质资源与环境重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省山地地质灾害防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 研究表层喀斯特带溶蚀岩体的力学特性, 有助于岩溶区边坡稳定性分析。本文以表层岩溶带溶蚀特征为依据, 设定溶蚀率和溶蚀均匀系数作为溶蚀特征参数。基于元胞自动机算法思路, 在颗粒离散元软件中构建不同溶蚀特征的岩体模型。对溶蚀岩体进行单轴压缩数值试验, 检测岩体加载过程中声发射事件。试验结果表明: 溶蚀岩体加载过程可分为: (1) 压密阶段; (2) 弹性变形阶段; (3) 稳定破裂发展阶段; (4) 不稳定破裂发展阶段; (5) 峰后缓慢软化阶段; (6) 峰后快速软化阶段。随溶蚀率增加, 岩体弹性变形阶段曲线缩短, 岩体抗压强度降低; 岩体由脆性破坏逐渐转为延性破坏; 同时, 溶蚀率增加, 岩体抗压强度下降速率由最初快速降低转为缓慢降低, 最终收敛。溶蚀均匀系数增加, 不稳定破裂阶段曲线增长, 岩体由局部破坏转为整体性破坏。研究发现溶蚀岩体单轴抗压强度与溶蚀特征参数呈负指数关系, 该关系式可用作溶蚀岩体强度取值, 实际工程中应增加溶蚀均匀系数对岩体质量的影响。溶蚀岩体裂纹扩展机理有助于边坡失稳机理研究。

关键词: 表层喀斯特带; 溶蚀岩体; 数值模拟; 溶蚀特征参数; 单轴抗压强度; 力学特性

中图分类号: TU45 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2023) 06-1258-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

表层喀斯特带位于包气带上部, 是地表水垂直入渗的区域, 具有溶蚀作用极为强烈的特点^[1]。西南地区因多雨、温暖的气候条件, 是全国喀斯特问题最集中的区域之一^[2]。西南表层喀斯特带发育深度一般为 3~20 m^[3-4], 最大深度达 30 m^[3], 导致工程活动无法避开表层喀斯特带存在的问题。溶蚀作用造成岩体结构劣化、强度降低等问题, 在外部因素作用下, 岩体极易发生变形, 出现失稳破坏, 进而引发崩塌、塌陷等地质灾害^[5-7]。因此, 开展溶蚀岩体的力学特性的研究, 有助于岩溶区边坡稳定性及灾害演化机

理等方面的研究。

因溶蚀作用的不确定性和复杂性, 难以获取合适的溶蚀岩体试样进行力学试验。目前, 学者们主要采取数值试验开展溶蚀岩体力学特性的研究。张社荣等^[8]采用颗粒流软件随机生成了不同溶蚀孔隙结构及不同发育程度的溶蚀岩体模型, 并探究溶蚀结构及发育程度对溶蚀岩体力学强度的影响。朱雷等^[9]在现场调查统计的基础上, 采用蒙特卡洛随机模拟建立了溶蚀砾岩模型, 获取了不同溶蚀程度的砾岩强度参数。张牧子^[10]运用随机聚类算法在颗粒离散元软件(PFC)中构建了溶蚀礁灰岩模型, 并得到了溶蚀岩体的单轴抗压强度值。

基金项目: 国家自然科学基金(42067046); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 128)

第一作者简介: 冷德明(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶工程地质方面的科研工作。E-mail: 540216744@qq.com。

通信作者: 史文兵(1980—), 男, 教授, 主要从事岩溶工程地质与地质灾害防治科研工作。E-mail: wbsbi@gzu.edu.cn。

收稿日期: 2021-11-30

现有研究主要采用随机算法模拟溶蚀过程, 从而构建溶蚀岩体模型。但这类算法对岩体实际溶蚀特征的反应不够准确, 导致获取的溶蚀岩体力学特征具有一定局限性。

许多学者发现表层岩溶带的溶蚀特点服从一定规律: 蒋忠诚^[2]指出地表水沿岩体裂隙溶蚀, 使岩体裂隙面不断扩大, 呈现溶蚀孔隙率随深度的增加而降低的规律; 罗小杰等^[11]通过对武汉表层岩溶带钻孔数据统计发现溶蚀率与埋深呈负指数关系; 曹贤发等^[12]对西南岩溶场地钻孔数据进行统计后认为, 溶蚀率随深度呈指数衰减。构建的溶蚀岩体模型, 必须考虑表层喀斯特带溶蚀特征, 才能更准确的反应溶蚀岩体力学特征。

本文通过野外调查、室内试验等手段获取了岩石力学强度和节理分布特征。在充分考虑表层喀斯特带岩体溶蚀特征基础上, 设定溶蚀率和溶蚀均匀系数两个特征参数。基于元胞自动机算法思路溶蚀, 在颗粒流离散元软件(PFC^{2D})中构建不同溶蚀特征的岩体模型。并进行单轴压缩数值试验, 并监测加载过程中声发射事件, 得到溶蚀岩体强度参数以及其变形破坏机理。为溶蚀边坡稳定性、岩溶区地质灾害的分析以及溶蚀岩体强度取值提供依据。

1 颗粒离散元模型

1.1 颗粒接触模型

1.1.1 平直节理模型

平直节理模型^[13] (Flat Joint Model, 简称 FJM) 中, 多边形的颗粒具有咬合和摩擦效应, 使得颗粒破坏

后只出现滑动或脱落, 不会发生旋转。平直节理模型的接触作用能解决岩石高压拉强度比问题, 使其被广泛用以模拟岩石内部的胶结作用。每个平直节理单元都存在粘结和未粘结 2 种状态(图 1(a)^[14]), 处于粘结状态的单元接触面上, 法向和切向粘结强度分别遵循最大拉应力准则和摩尔库伦准则; 处于未粘结状态单元的力学行为则是具有线弹性特征的摩擦滑移^[14]。平直节理单元的法向接触力 F_n 和切向接触力 F_s 分别采用下式计算:

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

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

其中,

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

$$n = \begin{cases} \frac{g_1^{(e)}}{g_1^{(e)} - g_0^{(e)}} & (\text{未粘结, } g_0^{(e)} > 0 \text{ 且 } g_1^{(e)} < 0) \\ 1 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $g(r)$ 为接触间距, $g(r) < 0$ 时, 表示两颗粒接触重叠; A 为接触横截面积; k_s 和 k_n 分别为切向和法向刚度, k_s 由指定的粘结刚度比($k^* = k_n/k_s$)求得, 而 k_n 通过式 (4) 求得:

$$k_n = \frac{E_c}{(R_A + R_B)} \quad (4)$$

粘结时, 断裂判据在法向和切向上分别采用最大拉应力准则(式 5) 和 Mohr-Coulomb 准则(式 6)。

$$F_n^{(e)} \leq -\sigma_c A^{(e)} \quad (5)$$

$$F_s^{(e)} \geq c A^{(e)} - F_n^{(e)} \tan \varphi \quad (6)$$

未粘结时, 颗粒间只存在摩擦作用, 接触面上不存在法向强度, 切向强度根据库仑法则判定(式 7) 是否发生滑动, 即满足下式时, 颗粒发生滑动。

$$|F_s| > -\mu F_n \quad (7)$$

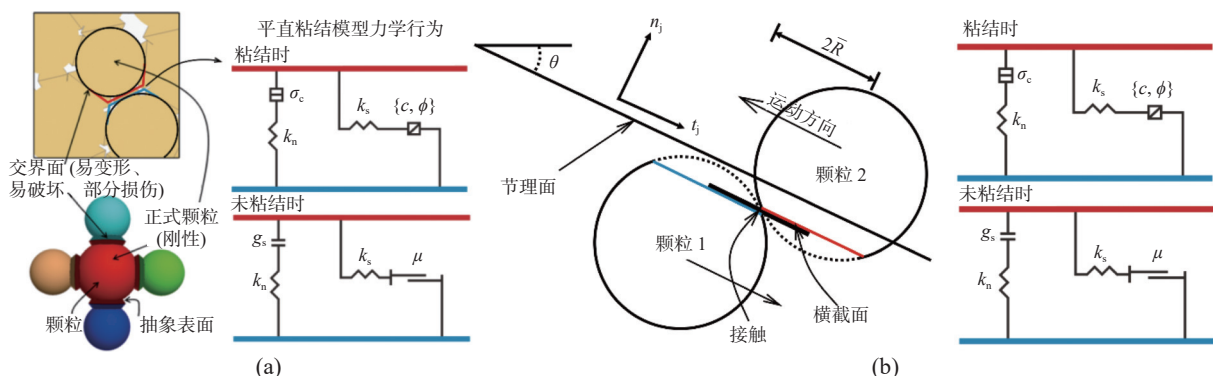


图 1 平直节理模型与光滑节理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flat joint model and smooth joint model

1.1.2 光滑节理模型

光滑节理模型 (Smooth Joint Model, 简称 SJM) 通过在节理两侧一定范围内的接触特性来模拟岩石的标准剪切行为^[15]。节理接触两侧颗粒可相互滑动, 以实现岩体节理面断裂后的错动效果。处粘结状态时模型具有线弹性特点; 超过强度极限值后, 光滑节理模型退化为具有线弹性和膨胀特性的摩擦界面^[14] (图 1(b)^[14])。光滑节理模型可看作一系列均匀分布于光滑节理面上的弹簧, 中心点位移接触点, 方向与节理面方向平行, 其接触面面积为^[15]:

$$A = \pi \bar{R}^2 \quad (8)$$

节理面上的接触力矢量 $\vec{F}$ 和相对位移增量矢量 $\Delta \vec{\delta}$ 可分解为法向与切向的分量:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= F_n \vec{n}_j + F_s \vec{t}_j \\ \Delta \vec{\delta} &= \Delta \delta_n \vec{n}_j + \Delta \delta_s \vec{t}_j \end{aligned} \quad (9)$$

在每一个计算步中, 将各力分量与其增值进行叠加, 从而得到新的力分量。力分量更新计算式:

$$\begin{aligned} F'_n &= F_n + \bar{k}_n A \Delta \delta_n \\ F'_s &= F_s - \bar{k}_s A \Delta \delta_s \end{aligned} \quad (10)$$

式中: σ_c 为抗拉强度, μ 为摩擦因数, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角。

节理的切向粘结强度 τ_c 由粘聚力 c_b 和内摩擦角 ϕ_b 及作用在节理面上的法向正应力 σ 决定, 根据库伦准则:

$$\tau_c = c_b + \sigma \tan \phi_b \quad (11)$$

1.2 离散裂隙网络

离散裂隙网络 (Discrete Fracture Network, 简称 DFN) 是 PFC 中自带的用于生成节理的命令集合。结构面数量和尺寸服从幂律 (Power-law) 分布。

结构面尺寸 l 分布在指定的 $l_{\min}$ 和 $l_{\max}$ ($l_{\max}$ 可不指定, 即无尺寸上限) 之间。岩体结构面尺寸的概率密度函数服从幂律分布, 关系式^[14] 为:

$$n(l) = \alpha \cdot l^{-a} \quad (12)$$

式中: $n(l)$ 为裂隙数量; l 为裂隙尺寸; a 为尺寸分布指数 ($a > 0$), 反映任意尺度下, 岩体结构面尺寸比值; α 为结构面密度参数, 在二维裂隙网络中, 裂隙密度 α 是通过测线法, 测得单位长度测线所截断裂隙的数量 (P_{10}), 单位为条/m; $n(l)$ 在双对数坐标系下图像如图 2 所示^[14]。

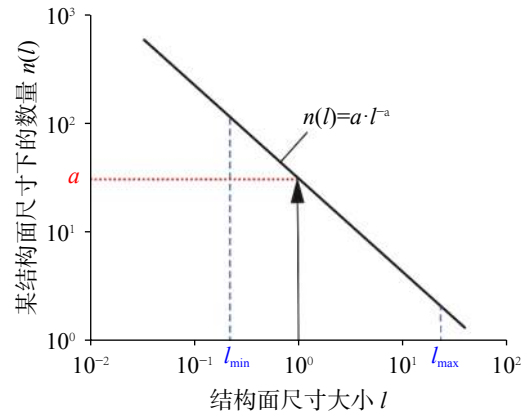


图 2 DFN 尺寸密度图

Fig. 2 Density diagram of DFN dimension

2 溶蚀岩体模型构建

2.1 节理岩体模型建立

2.1.1 室内试验

制备三组直径 50 mm, 高 100 mm 的标准圆柱形灰岩试样, 进行单轴压缩试验并取强度平均值, 以消除实验偶然误差。单轴试验采用应力控制伺服压力机, 以 $0.1 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率进行。得到灰岩的弹性模量 E 、泊松比 ν 、岩体单轴抗压强度 σ_c 。灰岩宏观力学参数如表 1:

表 1 岩体宏观力学参数

Table 1 Macro-mechanic parameters of rock mass

参数类型	力学参数属性	参数值
岩块	密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.50
	单轴抗压强度 σ_c / MPa	57.5
	抗拉强度 σ_t / MPa	3.50
	压拉强度之比 σ_c / σ_t	16.40
	弹性模量 E / GPa	22.10
	泊松比 ν	0.19
结构面参数	内聚力 C / MPa	0.08
	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	49.00

2.1.2 参数标定

根据灰岩实际物理力学参数, 通过数值力学实验 (单轴压缩、拉伸及直接剪切实验), 分别建立细观参数与宏观力学参数的函数关系式^[16]。将灰岩宏观力学参数代入上述函数式中反算细观参数的值 (图 3), 细观参数标定结果如表 2 所示。

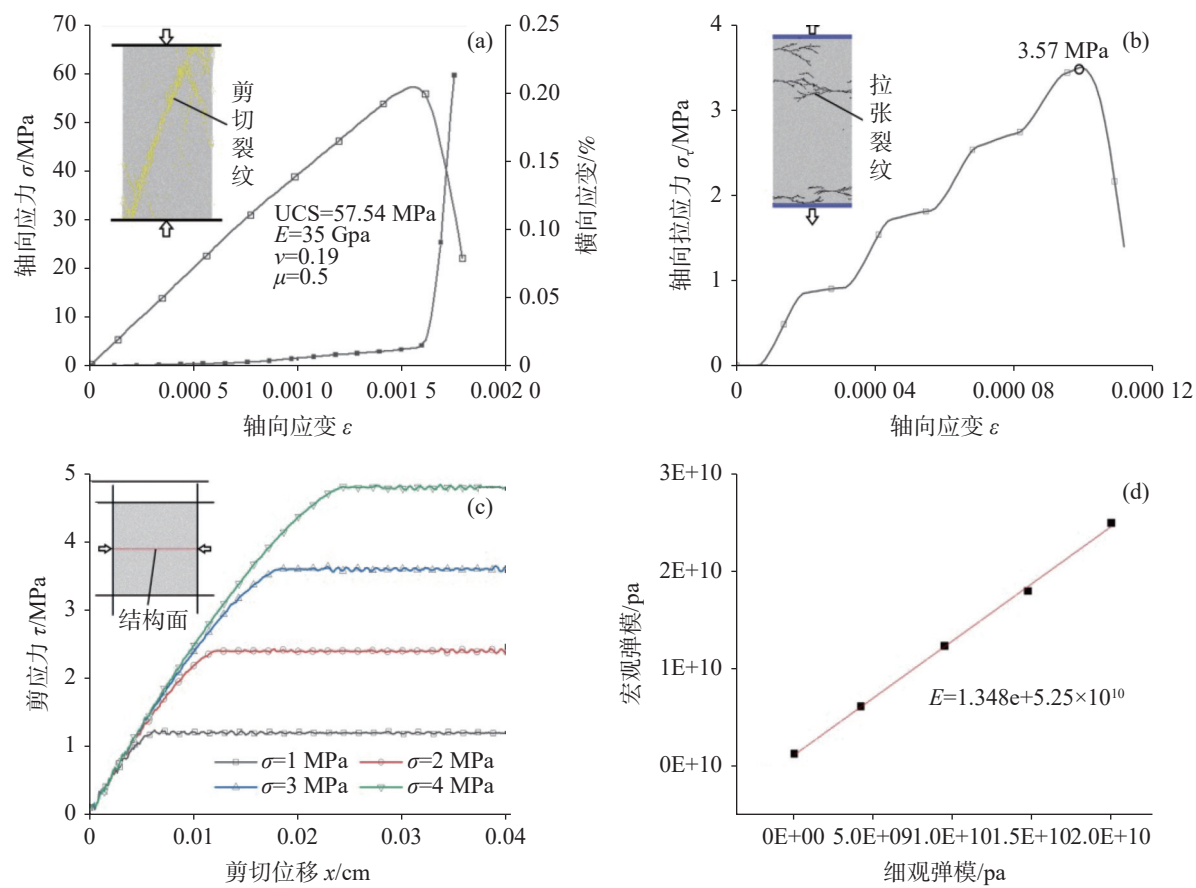


图 3 数值实验及拟合参数标定关系式

Fig. 3 Relationship between numerical test and fitting microscopic parameter calibration

表 2 岩体细观强度参数

Table 2 Micro-mechanic parameters of rock mass

参数类型	细观参数/单位	参数值
颗粒尺寸	半径比 R^*	1.66
	最小半径 R_{min}	0.01
平直节理模型 (Flat Joint Model)	杨氏模量 E_c /GPa	35.0
	刚度比 K^*	2.00
	抗拉强度 σ_t /MPa	6.00
	粘聚力 c /MPa	35.0
	内摩擦角 φ /°	0.00
	内摩擦系数 μ	0.50
光滑节理模型 (Smooth Joint Model)	法向刚度 K_n /GPa·m ⁻¹	30.00
	切向刚度 K_s /GPa·m ⁻¹	20.00
	内摩擦系数 μ	0.60
	内摩擦角 ϕ_b /°	49.70
	剪胀角 ψ /°	5.00
	抗拉强度 σ_c /MPa	0.00
	黏聚力 c_b /MPa	0.15

2.1.3 节理岩体分布特征

使用测线法对贵州某典型溶蚀岩体结构面进行

现场统计发现,研究区岩体主要发育三组结构面,即层理面及两组共轭节理面(在二维只存在倾角)。采用 P_{10} 控制:扫描线单位长度内裂隙条数,控制结构面生成密度。岩体结构面参数如表 3。

为消除尺寸效应对岩体强度的影响,对不同尺寸节理岩体进行数值力学试验,观察其强度变化。当岩体强度参数趋于稳定时,岩体的最小尺寸即为岩体单元表征体积(representative elementary volume, REV)。岩样 REV 体积为 4 m×8 m。

2.2 溶蚀特征参数及溶蚀流程

本文采用元胞自动机算法思路,模拟实际岩体溶蚀过程,构建溶蚀岩体模型。

元胞自动机包含四个基本要素:元胞、元胞状态、邻域和状态演化规则。

模型中所有离散元颗粒统称元胞;与特定状态颗粒相邻的所有颗粒即为邻域;元胞状态为某一时刻元胞所处状态,在该模型中元胞分为“溶蚀”或“未溶蚀”两种状态;状态演化规则是根据当前元胞

表 3 岩体结构面几何参数
Table 3 Geometric parameters of structural plane of rock mass

结构面名称	倾角		迹长		间隔	
	分布	平均值/标准差	分布	参数/(下、上限指数)	分布	P ₁₀ 密度(条/m)
节理面J1	正态	82.26/2.83	幂律	2.5/(0.15、2)	均匀	8
层面	正态	3.12/0.16	/	全贯通	均匀	4

状态和邻域元胞状态,判断下一时步当前元胞状态的函数。本次试验中,溶蚀的概率函数即为状态演化规则。

表层喀斯特带岩体的溶蚀以裂隙渗透溶蚀为主。故先对裂隙面颗粒进行溶蚀。考虑到地表水垂直入渗为主,导致竖向节理面溶蚀程度较水平层面更大。溶蚀演化规律 $f(dip)$ 定义式:

$$P_f = f(dip) = \begin{cases} 0.9, & dip \geq D \text{ (竖向)} \\ \frac{0.9}{R_{vh}}, & dip < D \text{ (水平向)} \end{cases} \quad (13)$$

式中: dip 为结构面倾角($^{\circ}$); D 为竖向和水平向分界角度($^{\circ}$),本次试验 D 取值为 75° ; R_{vh} 为竖向溶蚀与水平溶蚀概率比(取值为3)。

考虑岩体溶蚀发育程度与岩溶水接触面积正相关,即:非裂隙颗粒的溶蚀概率与邻域中已溶蚀颗粒数有关。非裂隙颗粒溶蚀演化规律 $g(n)$ 定义式:

$$P = g(n) = \left(\frac{n}{N}\right)^c \quad (14)$$

式中: n 为与元胞颗粒有接触的已溶蚀颗粒数量; N 为与元胞颗粒有接触的颗粒数量总和; c 为溶蚀指数,本次试验 c 取值为6。

为了更好描述溶蚀特征,定义了两种溶蚀特征指标。

溶蚀率定义式:

$$k = \frac{S_k}{S} \times 100\% \quad (15)$$

式中: S_k 为已溶蚀颗粒面积; S 为模拟岩样颗粒总表面积。

曹贤发^[17]等根据区域钻孔资料,拟合得到的溶蚀率函数 $r(h)$ 如式(16); b 值介于0.1~0.3之间。由实测钻孔溶蚀率发现:实测钻孔线溶蚀率通常在20%内^[11-12]。 $h=0$ 时溶蚀率最大,故计算 $a=0.2$ 。溶蚀率取值范围[0,20%]。

$$r = ae^{-bh} \quad (16)$$

溶蚀均匀系数定义:

流体渗流速度会造成岩溶洞隙形状分布不同^[18],

又或者随深度增加以及岩体形态差异^[19-20],导致岩体结构面内渗水汇集,造成溶蚀裂隙分布集中。为表征溶蚀裂隙的不均匀分布,通过控制随机溶蚀种子的生成概率 P_0 ,控制岩体溶蚀均匀程度。

$$P_0 = u_0 \quad (17)$$

式中:溶蚀概率 u 的范围为 $[u_{\min}, u_{\max}]$,可得均匀系数 u 即

$$u = \frac{u_0 - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (18)$$

式中: $u_{\min}$ 为5%; $u_{\max}$ 为30%;均匀系数 u 值域为[0,1]。

溶蚀均匀系数越小,表明岩体溶蚀裂隙越集中于岩体某一部分。溶蚀均匀系数越大,说明溶蚀裂隙在岩体分布越均匀。(图4列出了 $k=20\%$ 时,最小、最大溶蚀均匀系数示意图。)

溶蚀算法实现步骤:

(1)识别岩体模型中属节理、层面的颗粒(通过接触类型可判断),按概率($P_0=u_0$)在节理颗粒中随机产生一定数量的溶蚀颗粒(处溶蚀状态的元胞)。

(2)遍历与未溶蚀状态颗粒有接触的颗粒总数(邻域遍历)记作 N 。如此时该颗粒为非裂隙颗粒,且与该颗粒有接触的已溶蚀颗粒数为 n ,在下一计算时步内,按概率(状态演化规则 $P = g(n)$)转化为溶蚀状态颗粒;而未溶蚀的裂隙颗粒按概率(状态演化规则 $P = f(dip)$)转为溶蚀颗粒。

(3)每经历一次溶蚀计算溶蚀率 k ,直达到设定溶蚀率,溶蚀结束。删除所有溶蚀状态颗粒,溶蚀岩体模型建立完成。否则继续上述溶蚀过程2。

3 溶蚀岩体变形破坏过程

3.1 单轴压缩试验设计

在PFC^{2D}中进行数值单轴压缩试验,在试样顶、底部建立墙体,摩擦系数设为0(以消除试验的端面摩擦)。采用应变伺服机制控制墙体施加轴向力,加

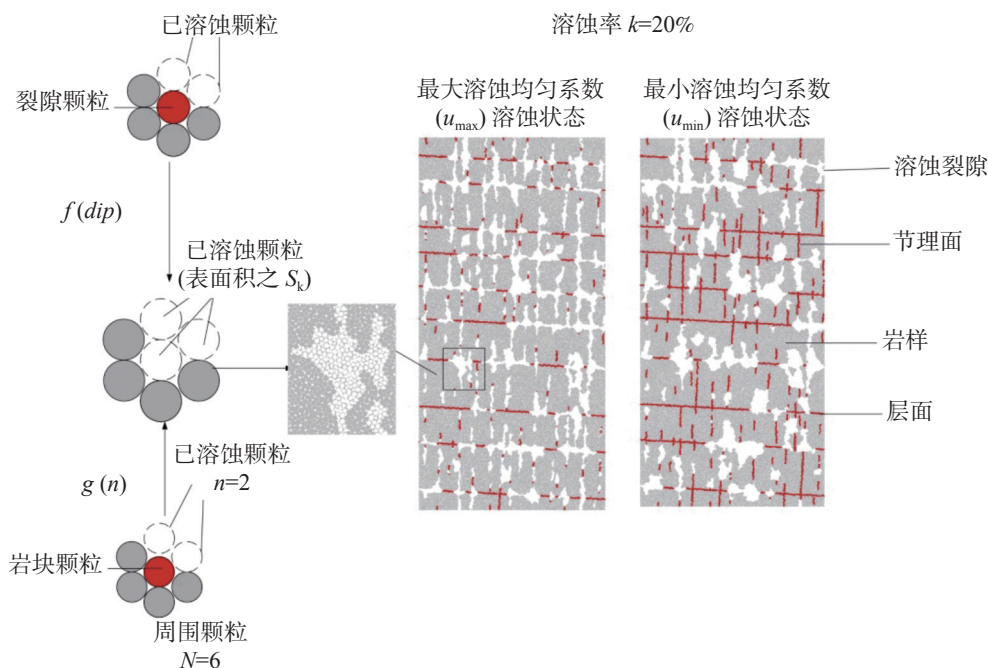


图 4 溶蚀转化过程及最小、大溶蚀均匀系数示意图

Fig. 4 Karstification and the minimum and maximum of dissolution uniformity coefficient

载速率为: $2 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

拟定溶蚀率为 2.5%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5%、15.0%、17.5% 和 20%，溶蚀均匀系数 u 为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0，共 48 ($k \times u$ 为 6×8) 组岩样进行全面试验。

3.2 溶蚀岩体应力应变及破坏分析

图 5 的应力应变曲线表明: 溶蚀率增加, 岩体峰值抗压强度、峰值应变均明显减小^[21]。 $u=0.2$ 时, $k=5\%$ 的溶蚀岩体峰值强度约为 $k=10\%$ 时峰值强度的 4 倍, 是 $k=15\%$ 溶蚀岩体峰值强度的 16 倍。 $u=0.8$ 时, $k=5\%$ 的溶蚀岩体峰值强度约是 $k=10\%$ 的溶蚀岩体峰值强度的 2 倍, 是 $k=15\%$ 溶蚀岩体峰值强度的 3~4 倍。

$k=10\%$ 时, $u=0.8$ 的溶蚀岩体峰值应力大约是 $u=0.2$ 的岩体峰值应力的两倍。 $k=15\%$ 时, $u=0.8$ 时岩体峰值应力大约是 $u=0.2$ 的岩体峰值应力的 5~6 倍, 且前者峰值应变是后者约 2 倍。随溶蚀率增加, 岩体峰后应力降变缓, 峰后应变显著增加, 随 u 增大, 溶蚀越均匀, 溶蚀率对岩体强度的影响相对减小。

通过对溶蚀岩体加载声发射事件及溶蚀岩体 ($u=0.8$, $k=10\%$) 加载过程裂纹变化图综合分析。将溶蚀岩体变形破坏过程分为六个阶段^[22]:

(1) 压密阶段 (在图中只出现极短的过程, 故不加入讨论); (2) 弹性变形阶段 (OA 段); (3) 稳定破裂

发展阶段 (AB 段); (4) 不稳定破裂发展阶段 (BC 段); (5) 峰后缓慢软化阶段 (CD 段); (6) 峰后快速软化阶段 (DE 段)。

弹性变形阶段 (OA 段): 岩体内部原生裂隙压密、闭合, 岩体呈弹性变形, 无明显声发射事件。随溶蚀率增加, 该阶段变短, 表明岩体有效受力面积减小, 在相同应力条件下, 岩体应变值更大, 更易进入塑性变形阶段。

稳定破裂发展阶段 (AB 段): 应变增长速率增加, 岩体以塑性变形为主。有较明显的声发射事件发生, 岩体内部出现新生裂隙。

不稳定破裂发展阶段 (BC 段): 应变增长速率较前几个阶段显著增加。声发射事件数增加明显, 在图 6(c) 与图 6(d) 中, 溶蚀裂隙、节理面两端均出现微裂纹, 并追踪软弱结构面, 导致裂隙延伸最终形成贯通, 岩体压应力达到峰值。随溶蚀均匀系数增加, 岩体破坏时产生微裂纹数增加, 该阶段曲线增长。

峰后缓慢软化阶段 (CD 段): 岩体达到峰值强度后, 并未立即丧失强度, 峰后声发射事件普遍高于峰前。从图 6(e) 中发现宏观裂隙面形态无明显变化, 但累计微裂纹数阶梯增加, 说明新生裂隙产生于裂隙面间及周围薄弱岩桥位置处。岩桥的锁固作用、溶蚀裂隙及节理面间的摩擦作用提供该阶段岩体的承载能力^[23]。

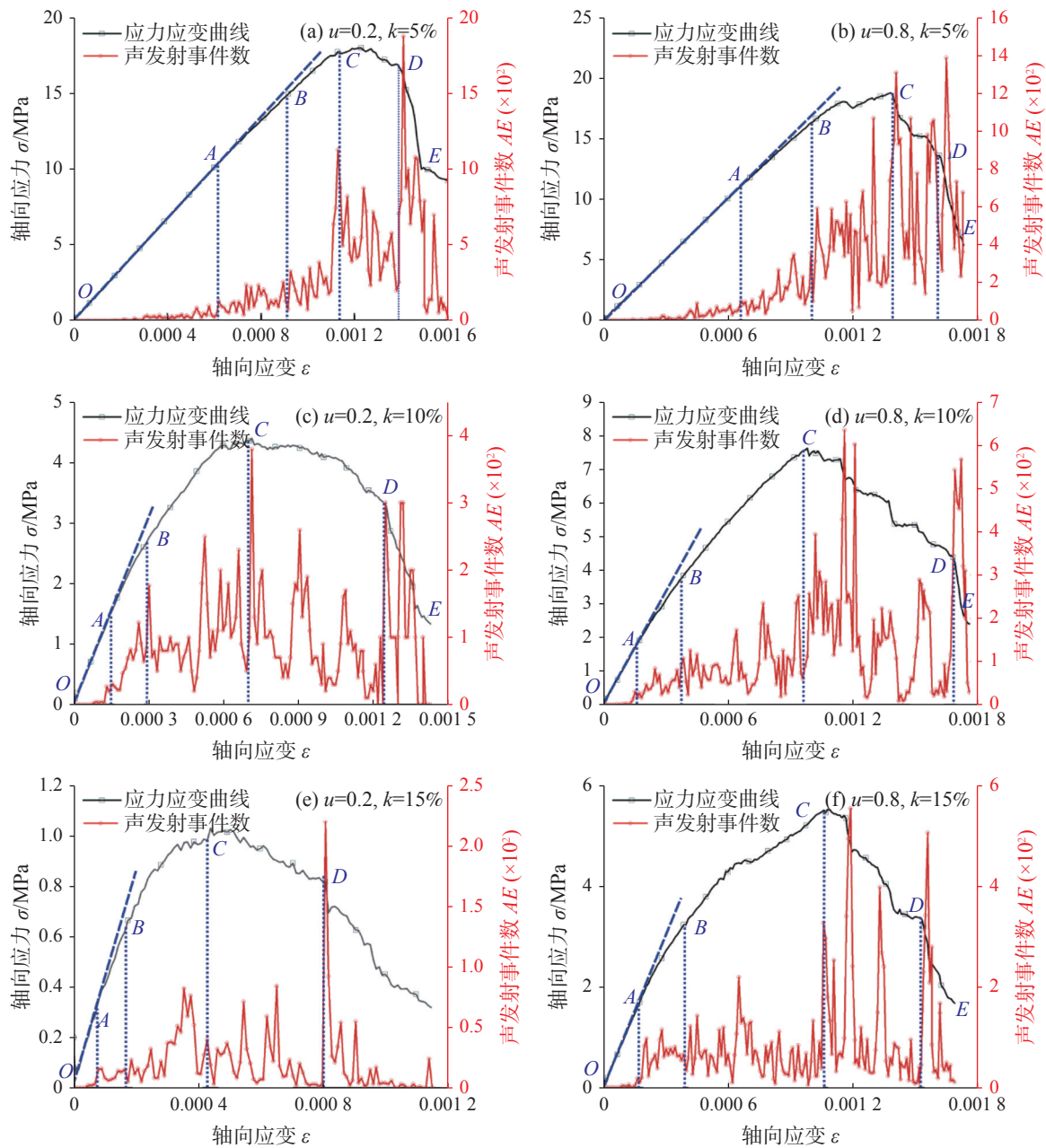


图5 加载条件下溶蚀岩体应力应变曲线、声发射特征

Fig. 5 Stress-strain curve and acoustic emission characteristics of karstified rock mass on loading

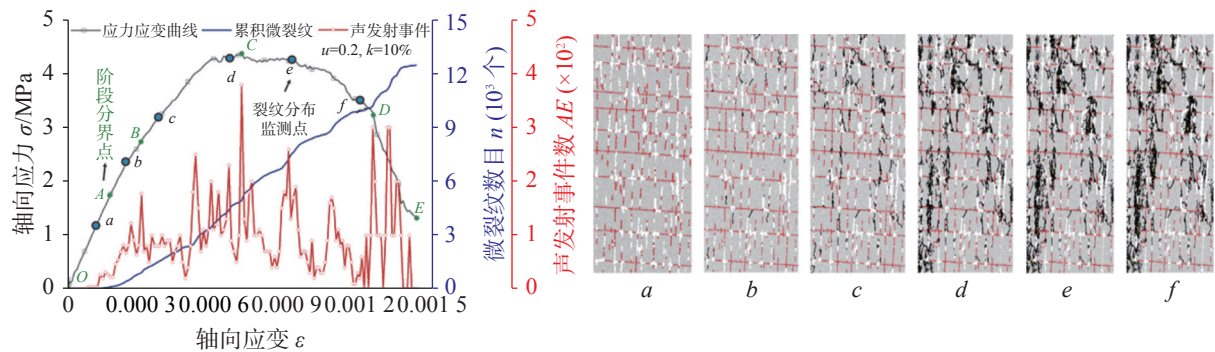


图6 岩体变形破坏过程及各阶段裂纹扩展

Fig. 6 Deformation and failure process of rock mass and crack propagation

峰后快速软化阶段(DE 段): 岩样应力快速下降。岩体溶蚀率越高, 声发射事件减少明显, 直观表现为: 破坏后, 岩体累计微裂纹数越少。岩体内部岩桥基本断裂, 裂隙面间摩擦作用丧失。随溶蚀率增加, 岩体峰后应力降(CD 段与 DE 段)变缓, 岩体由脆性破

坏转为延性破坏^[24]。

3.3 溶蚀岩体破坏后微裂纹特征分析

图 7 选取溶蚀率 k 为 5%、10%、15% 和 20%, 溶蚀均匀系数 u 为 0、0.4、0.8, 共 12 个溶蚀岩体破坏后的微裂纹图, 分析其破坏后的特征。

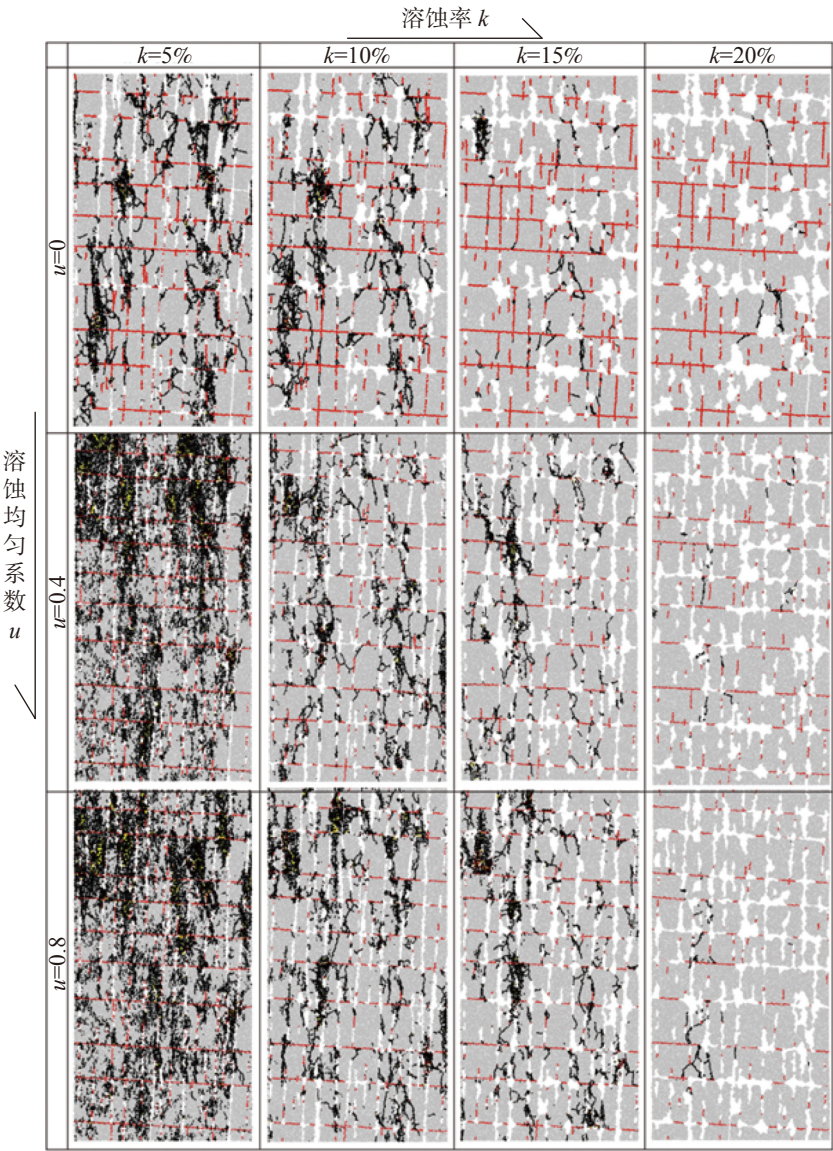


图 7 溶蚀岩体破坏后微裂纹分布图

Fig. 7 Distribution of microcracks after the damage of karstified rock mass

由格里菲斯理论可知, 洞隙缺陷两端应力集中, 在最脆弱的岩桥或长度最短的岩桥部位首先产生微裂纹, 并且微裂纹会追踪软弱裂隙面形成贯通。溶蚀均匀系数越小, 岩体溶蚀洞隙洞径越大, 分布越集中, 洞隙两端更容易产生裂隙形成贯通, 导致局部破裂; 岩体内未溶蚀部位, 强度更高, 产生微裂纹数更少^[25]。溶蚀均匀系数越大, 溶蚀裂隙在岩体内部分

布越均匀, 岩体由局部破坏转为整体性破坏; 相同溶蚀率情况下, 溶蚀洞径更小, 宏观裂隙形成贯通需历经更长过程, 造成不稳定破裂发展阶段曲线增长。

3.4 单轴抗压强度与溶蚀参数量化关系

研究发现: 溶蚀岩体单轴抗压强度与溶蚀特征参数呈函数关系。图 8 为不同均匀系数下溶蚀率与

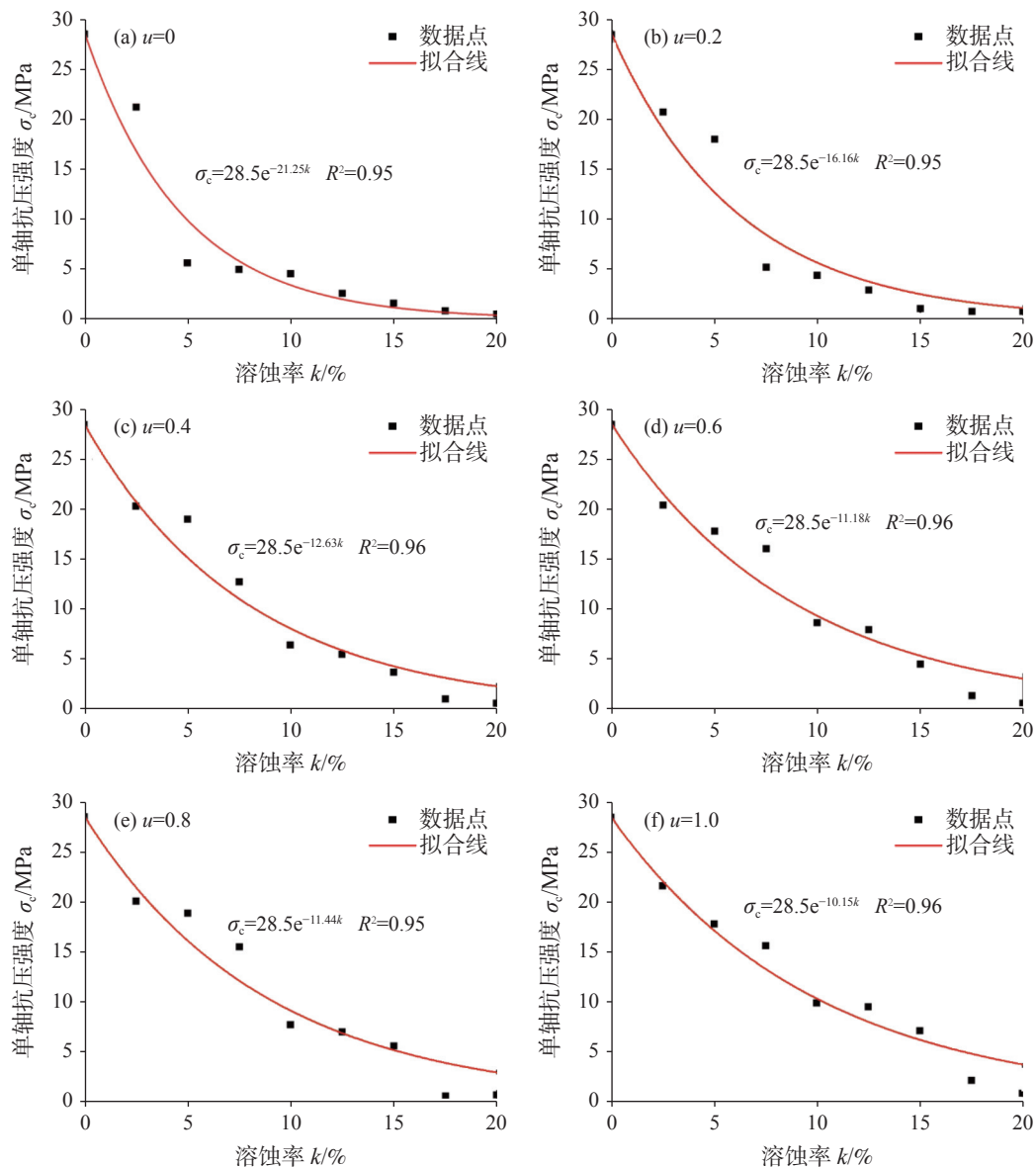


图8 不同溶蚀均匀系数下溶蚀率与单轴抗压强度关系图

Fig. 8 Relationship between uniaxial compressive strength and dissolution rate in terms of different dissolution uniformity coefficients

溶蚀岩体单轴抗压强度关系图。

在同一溶蚀均匀系数情况下,岩体单轴强度随溶蚀率成负指数函数关系^[26]。即

$$\sigma_c = \sigma_{c0} e^{-C \cdot k} \quad (19)$$

式中: σ_{c0} 为未溶蚀岩体单轴抗压强度(单位 MPa); k 为溶蚀率, C 与均匀系数 u 有关如式 (20)。

$$C = 15.67u^2 - 26.23u + 21.02 \quad (20)$$

在不同溶蚀均匀系数情况下,单轴抗压强度随溶蚀率增加呈下降趋势。最初单轴抗压强度迅速降低,随溶蚀率增加,抗压强度降低减缓,最终收敛为固定值。随溶蚀均匀系数增加,曲线曲率减小,单轴

抗压强度下降逐渐趋于线性。

4 结 论

通过颗粒离散元软件(PFC^{2D}),对不同溶蚀率和不同溶蚀均匀系数的溶蚀岩体进行单轴压缩试验,获取了单轴压缩条件下溶蚀岩体的应力、应变和加载过程声发射特性,进一步分析了溶蚀岩体的变形破坏特征。同时,也建立了溶蚀岩体单轴抗压强度与溶蚀特征参数(k , u)函数关系式。取得了以下认识:

(1)溶蚀岩体变形破坏可分6个阶段:溶隙压密(该阶段特征不明显)、弹性变形、稳定破裂发展、不

稳定破裂发展、峰后缓慢软化和峰后快速软化阶段。随溶蚀率增加, 岩体弹性变形阶段曲线缩短, 不稳定破裂发展阶段曲线增长。溶蚀岩体峰值强度后声发射事件表明, 峰后岩体主要是岩体内岩桥的锁固作用以及裂隙面间摩擦作用提供强度。获取的溶蚀岩体变形破坏特征有助于揭示岩溶区斜坡失稳机理。

(2) 溶蚀岩体溶蚀率越高, 岩体受力骨架面积越小, 岩体单轴抗压强度越低; 岩体破坏形式由脆性破坏逐渐转为延性破坏。溶蚀均匀系数越大, 岩体破坏形式由局部破坏逐渐转为整体破坏。

(3) 溶蚀岩体单轴抗压强度与溶蚀率呈负指数关系。函数式中 C 与均匀系数 u 有关, 且随溶蚀均匀系数增加, 该函数关系式逐渐趋于线性。构建的函数关系式, 可用于岩溶区地基承载力计算中, 溶蚀岩体力学强度的取值。相同溶蚀率情况下, 均匀系数越小(溶蚀孔径越大), 单轴抗压强度越低, 溶蚀均匀系数可纳入岩体质量评价体系。

参考文献

- [1] 蒋忠诚, 裴建国, 夏日元, 张美良, 雷明堂. 我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(4): 349-354.
JIANG Zhongcheng, PEI Jianguo, XIA Riyuan, ZHANG Meiliang, LEI Mingtang. Progresses and important activities of karst research during the 11th Five-Year Plan in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(4): 349-354.
- [2] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. *中国岩溶*, 1983, 2(2): 147-150.
LI Datong, LUO Yan. Measurement of carbonate rocks distribution area in China[J]. *Carsologica Sinica*, 1983, 2(2): 147-150.
- [3] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. *热带地理*, 1998, 18(4): 322-326.
JIANG Zhongcheng. Features of epikarst zone in South China and formation mechanism[J]. *Tropical Geography*, 1998, 18(4): 322-326.
- [4] 彭韬, 周长生, 宁茂岐, 付磊, 戴德求, 王世杰. 基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(6): 1262-1270.
PENG Tao, ZHOU Changsheng, NING Maoqi, FU Lei, DAI Deqiu, WANG Shijie. Study on spatial distribution of epikarst zone on plateau karst slope based on ground-penetrating radar[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6): 1262-1270.
- [5] 杜尊龙. 强烈岩溶控制型高速滑坡形成机理研究: 以武陵鸡尾山滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
DU Zunlong. Study on formation mechanism of high-speed landslide controlled by intensively developed karst: A case study of cocktail mountain landslide in Wulong[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [6] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 秦臻, 张鹏. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 51-61.
HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, QIN Zhen, ZHANG Peng. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 51-61.
- [7] 光耀华. 岩溶地区工程地质研究的若干新进展概述[J]. *中国岩溶*, 1998, 17(4): 70-75.
GUANG Yaohua. An introduction to the progress of the geologic engineering researches in karst regions[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(4): 70-75.
- [8] 张社荣, 王泉华, 王超. 孔隙结构特征及发育程度对溶蚀岩体力学特性的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(10): 1018-1028.
ZHANG Sherong, WANG Xiaohua, WANG Chao. Effects of pore structure and its development degree on dissolution rock mechanical characteristics[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(10): 1018-1028.
- [9] 朱雷, 王小群, 聂德新, 郑百录, 姚男. 基于随机模型溶蚀岩体强度参数研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1034-1038.
ZHU Lei, WANG Xiaoqun, NIE Dexin, ZHENG Bailu, YAO Nan. Stochastic method based evaluation of corrosion rock strength parameters[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1034-1038.
- [10] 张牧子, 孙永福, 宋玉鹏, 修宗祥, 赵晓龙, 胡光海. 单轴压缩条件下溶蚀礁灰岩细观变形破坏特征研究[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(2): 222-229.
ZHANG Muzi, SUN Yongfu, SONG Yupeng, XIU Zongxiang, ZHAO Xiaolong, HU Guanghai. Study on the microstructure and failure characteristics of limestone in dissolution reef under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(2): 222-229.
- [11] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(4): 419-432.
LUO Xiaojie. Features of shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(4): 419-432.
- [12] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲. 西南岩溶区建筑地基溶蚀程度深度分布规律[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(2): 253-259.
CAO Xianfa, LIU Zhikui, LI Hailing. Dissolution distribution rules with depth at building ground in southwestern karst area, China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(2): 253-259.
- [13] 何珣, 何勇, 郭磊, 潘绪超, 庞春旭, 乔良, 涂建. 基于Flat-Joint接触模型的软化本构开发及其参数影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2277-2287.
HE Xun, HE Yong, GUO Lei, PAN Xuchao, PANG Chunxu, QIAO Liang, TU Jian. Development of softening constitutive model based on Flat-Joint contact model and parametric analysis[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2277-2287.

- sis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2277-2287.
- [14] Itasca Consulting Group. PFC 5.0 documentation[Z]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2014.
- [15] 王涛, 周炜波, 徐大朋, 曾俊. 基于光滑节理模型的岩体水力压裂数值模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(4): 500-508. WANG Tao, ZHOU Wei-bo, XU Da-peng, ZENG Jun. Numerical simulation of hydraulic fracturing of rock mass based on smooth joint model[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(4): 500-508.
- [16] Chen P Y. Effects of microparameters on macroparameters of flat-jointed bonded-particle materials and suggestions on trial-and-error method[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(2): 663-677.
- [17] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(4): 577-583. CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 577-583.
- [18] Garcia Rios M, Luquot L, Soler J M, Cama J. Influence of the flow rate on dissolution and precipitation features during percolation of CO₂-rich sulfate solutions through fractured limestone samples[J]. *Chemical Geology*, 2015, 414: 95-108.
- [19] Ford D, Williams P D. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [20] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [21] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 姚华彦. 单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(2): 294-302.
- TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, YAO Huayan. Analysis of mesomechanical test of rock salt considering coupled stress-dissolving effect under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(2): 294-302.
- [22] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 147-152. LI Shulin, TANG Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 147-152.
- [23] 刘海峰, 郑坤, 朱长歧, 孟庆山, 吴文娟. 基于应力-应变曲线的礁灰岩脆性特征评价[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 673-680. LIU Haifeng, ZHENG Kun, ZHU Changqi, MENG Qingshan, WU Wenjuan. Brittleness evaluation of coral reef limestone based on stress-strain curve[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 673-680.
- [24] 郑坤. 珊瑚礁灰岩工程地质及声发射特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. ZHENG Kun. Study on engineering geology and acoustic emission characteristics of coral reef limestone[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [25] Yang W, Zhang Q, Ranjith P G, Yu R, Luo R, Huang C, Wang G. A damage mechanical model applied to analysis of mechanical properties of jointed rock masses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 113-128.
- [26] Fakhimi A, Alavi Gharahbagh E. Discrete element analysis of the effect of pore size and pore distribution on the mechanical behavior of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 77-85.

Numerical simulation on uniaxial compressive mechanical properties of karstified rock mass in epikarst zone

LENG Deming^{1,3}, SHI Wenbing^{2,3}, LI Hua¹, LIANG Feng^{2,3}

(1. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Mountain Geohazard

Prevention R&D Center of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract The research of mechanical properties of karstified rock mass is helpful to the study of slope stability, foundation bearing capacity and mechanism of karst-induced disasters in karst area. However, it is difficult to obtain suitable rock samples for mechanical tests of karstified rock mass, or there exist experimental results with large differences. Nowadays, many scholars have studied mechanical properties by numerical simulation and have achieved greatly. In this kind of research, the stochastic method to simulate the karstification process is mainly adopted, whose algorithm is relatively simple but with less accurate response to the karstified characteristics of rock mass, thus leading to the limitations of the results.

Relevant literature shows that the epikarst zone presents characteristics of negative exponential relationship

between the dissolution rate and depth, uneven distribution of dissolved pores caused by the difference of dissolution morphology, and more vertical karstification than horizontal karstification. In this study, two parameters of the karstification characteristics—the dissolution rate (the quantitative index of dissolution degree of rock mass) and dissolution uniformity coefficient (representing the uneven distribution of dissolution fractures)—have been set to analyze its characteristics in the epikarst zone. According to the characteristics of limestone joint in a typical karst area in Guizhou, the equivalent model of jointed rock mass has been established by using the Flat Joint Model (FJM), Smooth Joint Model (SJM) and Discrete Fracture Network (DFN). Based on the cellular automata algorithm and the dissolution of the equivalent model of jointed rock mass, the karstified rock mass model with different dissolution rates and different dissolution uniformity coefficients has been obtained. According to the numerical uniaxial compression test and the acoustic emission events in the process of loading rock mass. A total of 48 groups of test samples were collected in terms of 8 grades of dissolution rate and 6 groups of dissolution uniformity coefficient.

The results show that the loading process of karstified rock mass can be divided into six stages: (1) stage of compaction; (2) stage of elastic deformation; (3) stage of stable fracture development; (4) stage of unstable fracture development; (5) stage of post-peak strain softening; (6) stage of post-peak rapid strain softening. The karstification reduces the cementation between rock masses and destroys the skeleton of rock mass, which leads to the following effects. With an increase of dissolution rate, the uniaxial compressive strength decreases. The curve shortens at the stage of elastic deformation. The number of acoustic emission events decreases significantly when the rock mass is damaged. The failure mode of rock mass gradually changes from brittle failure to ductile failure. The strength after failure mainly comes from the locking effect of rock bridge and the friction between fracture surfaces. At the same time, with the continuous increase of dissolution rate, the compressive strength of rock mass declines from rapid to slow rate. The higher the dissolution uniformity coefficient is, the smaller size the dissolution pore and the more uniform distribution of dissolution fractures may become. Under these conditions, the formation and penetration of macro cracks need to go through a longer process, and the curve of unstable fracture development increases. The internal stress of rock mass is more divergent, and the rock mass changes from local failure to overall failure. The fitting of uniaxial compressive strength and karstification characteristic parameters (k , U) indicate their negative exponential relationship, and the exponential constant C is related to the uniformity coefficient u . The relationship can be used as the basis for determining the strength of karstified rock mass. In practical engineering, the deformation state of karstified rock mass can be judged according to this acoustic emission characteristics, and thus corresponding treatment measures can be taken. In the evaluation of rock mass quality, the dissolution uniformity coefficient can be used as an auxiliary evaluation basis, in addition to the dissolution rate as the main feature of dissolution development.

Key words epikarst zone, karstified rock mass, numerical simulation, karstified characteristic parameter, uniaxial compressive strength, mechanical property

(编辑 杨杨)