

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0345

基于 BP 神经网络的岩土胶结材料速率敏感效应预测研究

旷杜敏¹, 龙志林¹, 周益春², 闫超萍¹, 陈佳敏¹

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 为建立针对岩土类胶结材料的微观特征-加载速率-宏观响应之间的对应关系, 基于离散单元法, 通过施加平行胶结模型模拟胶结材料物理力学特征, 并进行不同微观参数(胶结数目、胶结黏聚力、胶结杨氏模量、胶结内摩擦角、孔隙比)以及不同加载速率(1、0.1、0.01、0.002 mm/min)条件下的三轴不排水数值试验。以残余强度、峰值强度及其对应的轴向应变 3 个参量为基础, 探讨不同微观参数条件下的加载速率效应特征。在数值试验结果基础上, 采用 BP 神经网络算法建立胶结材料率效应预测的智能模型。研究表明, (1) 胶结材料具有显著的速率敏感性特征, 其峰值强度随加载速率的增加显著增加, 呈半对数线性相关, 但其残余强度以及峰值强度处的轴向应变对加载速率敏感性较弱; (2) 胶结材料对加载速率敏感性的特征主要由其内部胶结破碎引起, 剪切全过程中单位应变内的平均胶结破碎率变化趋势与偏应力变化趋势一致, 随着加载速率的增加, 其内部平均胶结破碎率呈现增加趋势; (3) 所建立的 BP 神经网络模型充分考虑了微观参数以及加载速率对宏观特性的影响, 能较好地反映胶结材料对加载速率敏感效应特征, 相对误差在 10% 左右。

关 键 词: 胶结材料; 离散单元法; 率敏感性; 神经网络

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)增 1-0390-10

Prediction of rate-dependent behaviors of cemented geo-materials based on BP neural network

KUANG Du-min¹, LONG Zhi-lin¹, ZHOU Yi-chun², YAN Chao-ping¹, CHEN Jia-min¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: In order to establish the relationship among microscopic properties, loading rates and macroscopic responses of cemented geo-materials, the parallel bond model was employed to simulate the physical and mechanical characteristics of the cemented materials based on the discrete element method (DEM). Moreover, a series of undrained triaxial numerical tests were performed with different microscopic parameters (number, cohesion, Young's modulus, internal friction angle of bonds, and void ratio) and loading rates (1, 0.1, 0.01, 0.002 mm/min). Based on three parameters include residual strength, peak strength and the corresponding axial strain, the rate-dependent behaviors of the cemented geo-materials under different microscopic parameters were discussed. Furthermore, based on the numerical test results, BP neural network algorithm is used to establish an intelligent model for predicting the rate-dependent behavior of the macroscopic properties in cemented materials. The results show that: (1) the cemented material has a significant loading rate sensitivity characteristics, presenting a significant increase of the peak strength with the increase of loading rate, and it has a semi-logarithmic linear correlation. However the residual strength and axial strain at peak strength are less sensitive to the loading rates; (2) the rate-dependent behavior of the cemented material is mainly caused by the fragmentation of internal bonds. During the whole shearing process, the evolution of average bond breakage percentage per unit strain shows a similar trend as that of the deviatoric stress. In addition, the average bond breakage percentage increases with the increase of loading rates; (3) the proposed BP neural network model, which considers the influence of microscopic parameters and loading rates on macroscopic responses, can reasonably describe the rate-dependent behavior of the macroscopic properties in cemented materials with the relative error around 10%.

Keywords: cemented materials; discrete element method; rate-dependent behavior; neural network

收稿日期: 2019-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51471139)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51471139).

第一作者简介: 旷杜敏, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事钙质砂力学变形特征研究。E-mail: kuangduminxtu@163.com

通讯作者: 龙志林, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事材料力学行为研究。E-mail: longzl@xtu.edu.cn

1 引言

胶结物质广泛存在于岩土工程材料之中诸如岩石、钙质砂、结构性土等^[1-2]。胶结岩土材料的宏观力学行为均具有显著的加载速率相关特性^[3-5], 实际工程中岩体爆破开挖、地基长期沉降等问题均与岩土工程材料加载速率特性存在紧密联系, 而胶结作为该类材料的主要微观特征, 对其率相关特性的影响不容忽视^[6-8]。国内外已有许多学者针对胶结岩土类工程材料的率相关特性进行了深入研究, 王洪亮等^[9]针对红砂岩进行了不同应变率条件下的单轴压缩试验, 得到了应变率与峰值强度和破坏过程的定量关系。蔡羽等^[3]以湛江强结构性黏土为对象进行不同加载速率条件下三轴试验, 发现其剪切强度随应变速率增大呈现先减小后增大的趋势, 存在临界速率现象, 但未深入分析其原因。陈铁林等^[10]通过对结构性黏土进行三轴不排水试验对率效应机制进行探讨, 认为应变速率对强度的影响是多种因素共同作用的结果, 其中胶结发挥主要作用。此外, 考虑到宏观室内试验无法测定内部微观力学响应, 扫描电镜 (scanning electronic microscopy, SEM)、CT (computer tomography) 扫描等微观测量技术逐渐被应用于内部微观信息的观测之中^[11-12], 也无法定量描述胶结材料内部结构量的演化过程, 难以得到胶结对宏观力学性质的具体影响方式和形式。离散单元法作为一种基于非连续介质力学的数值计算方法^[13], 直接从微观接触力学角度对材料特性进行表征, 能有效地考虑微观特征对宏观特性的影响, 已被广泛地应用于胶结岩土材料的研究之中^[14-17]。赵国彦等^[18]利用平行黏结模型进行胶结材料三轴数值试验, 提出微观特性与宏观特性的理论公式。Yang 等^[19]基于中心合成设计方法, 给出了岩石微观参数和宏观特性的线性相关关系。张学朋等^[20]采用黏结颗粒模型进行了不同加载速率下花岗岩单轴压缩与巴西劈裂数值试验, 得到加载速率对花岗岩峰值强度以及内部破坏形态的影响。李建乐等^[21]选取颗粒间胶结颗粒模型建立了煤岩数值模型, 进行了不同加载速率下双轴试验, 获得其内部裂纹扩展全过程。上述研究基于离散单元法分别对胶结材料微观特征与宏观响应的关系、加载速率与宏观响应的关系进行了探讨, 却并未建立起胶结材料微观特征-加载速率-宏观响应三者之间的耦合关系。由于需充分反映多个尺度之间的相互联系, 其对应关系中存在较多的已知量和未知量, 具有高度复杂的非线性特征, 难以通过简单的数学方程对其进行描述。

人工神经网络算法作为一种具有强大学习能力、良好容错性以及高度非线性映射能力的智能算法, 在处理需同时考虑多因素、多层次的模糊信息时具有显著优势, 已得到广泛应用。颜敬等^[22]利用人工神经网络算法实现了无黏结材料宏微观参数之间的互演计算。李澄清等^[23]基于 BP 神经网络实现了土体离散元模型细观力学参数的反演分析, 并通过室内试验进行验证, 得到较好结果。张楠等^[24]采用基于因子分析的 BP 神经网络对岩体变形模量进行预测, 结果与实际工程测量结果吻合良好。

尽管目前已有许多针对岩土类胶结材料率敏性特征的研究, 但其多关注加载速率与宏观响应之间的关系, 未充分考虑微观特征的影响。本研究针对胶结这一主要微观特征, 基于离散单元法, 采用平行胶结模型对其进行表征, 构建能描述胶结材料力学特性的离散元数值模型, 并开展不同胶结模型参数条件的三轴不排水率敏性特征试验, 获得不同加载速率下的宏微观响应, 综合考量微观特性-加载速率-宏观响应三者之间的相互联系, 基于 BP 神经网络算法建立起能反映胶结材料率效应的人工神经网络智能模型。

2 平行胶结模型

采用离散单元法对胶结材料进行表征时其正确性与合理性取决于颗粒间胶结模型的选取, 本文采用平行胶结模型^[25]对土颗粒间胶结作用进行表征, 该接触模型已被广泛应用于胶结岩土材料力学性质的研究中^[26-28], 如图 1 所示。

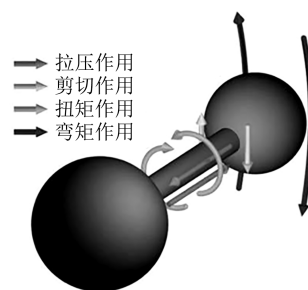


图 1 平行胶结模型
Fig.1 Parallel bond model

两个胶结颗粒之间存在 6 种接触形式, 即法向的拉压接触、两个切向方向的剪切作用、扭矩和两个方向的弯矩作用, 6 种接触力可由式 (1) 计算得到。

$$\left. \begin{aligned} F_r &= K_r \Delta r; & F_{s1} &= K_{s1} \Delta s_1; & F_{s2} &= K_{s2} \Delta s_2 \\ M_t &= K_t \Delta \alpha; & M_{b1} &= K_{b1} \Delta \alpha_{b1}; & M_{b2} &= K_{b2} \Delta \alpha_{b2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F 、 M 、 K 、 $\Delta r(\Delta s)$ 、 $\Delta\alpha$ 分别为力、扭矩、刚度常数、相对平动和转动位移; 下标 r 、 s 、 t 、 b 分别为径向、剪切、扭转和弯曲分量。

在各向同性的情况下, $K_s = K_{s1} = K_{s2}$ 和 $K_b = K_{b1} = K_{b2}$, 仅需要 4 个刚度参数, 进行计算所需微观参数除颗粒质量 m 、半径 R 之外, 还需 4 个破坏极限参数 F_{r0} 、 F_{s0} 、 M_{t0} 、 M_{b0} , 分别为两个颗粒之间所能承受的最大拉力、最大剪切力、最大扭矩和最大弯矩, 可由式 (2) 计算得到。

$$\left. \begin{aligned} K_r &= \frac{\sqrt{2}ER}{2(1-2\nu)}; \frac{K_s}{K_r} = \frac{1-5\nu}{1+\nu}; K_t = \frac{\pi ER^3}{8(1+\nu)}; K_b = \frac{\pi ER^3}{2} \\ F_{r0} &= \frac{\pi R^2 c}{\tan \varphi}; F_{s0} = \pi R^2 c; M_{t0} = \frac{F_{s0} R}{2}; M_{b0} = \frac{F_{r0} R}{4} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E 为胶结杨氏模量; c 为胶结黏聚力; φ 为胶结内摩擦角; ν 为胶结泊松比。

胶结受到外部作用力达到极限状态时将失效断裂, 在该模型中采用类似于摩尔-库仑准则的方法将上述 4 种作用形式统一形成断裂准则, 即

$$\frac{F_r}{F_{r0}} + \frac{|F_s|}{F_{s0}} + \frac{|M_t|}{M_{t0}} + \frac{|M_b|}{M_{b0}} \geq 1 \quad (3)$$

式中: $\vec{F}_s = \vec{F}_{s1} + \vec{F}_{s2}$; $\vec{M}_b = \vec{M}_{b1} + \vec{M}_{b2}$ 。

胶结断裂后颗粒之间通过线弹性接触模型^[29]产生相互作用, 其接触力大小由颗粒接触刚度 (法向接触刚度 k_n 、切向接触刚度 k_s) 和颗粒内摩擦角 θ 控制。

3 模型验证及数值试验设计

3.1 模型验证

结构性土 (亦即胶结土) 是一种典型的胶结型岩土材料, 分布十分广泛, 一般认为天然土体均具有一定的结构性, 其内部胶结的存在是使得其力学性质区别于重塑土的主要原因^[30]。为更好地反映胶结对率效应的影响规律, 本研究选定结构性土为主要研究对象, 为验证平行胶结接触模型模拟岩土胶结材料率效应的可行性和适用性, 通过三轴不排水试验模拟与室内结构性土三轴不排水试验结果进行对比分析。室内试验所用试样为人工制备结构性土, 总质量为 130 g, 试样中盐颗粒含量为 25%, 水泥含量为 4.5%, 高岭土含量为 20%, 土颗粒含量为 50.5%。制样完成后将试样抽真空饱和 3 h, 使得试样处于饱和状态, 其后在清水中浸泡 24 h 使水泥初凝, 形成胶结, 最后将试样至于流动水浴中养护

6 d 除去试样中盐颗粒, 制备得到试样孔隙比为 1.6, 其试验土样具体物理性质见表 1。三轴不排水室内试验所采用围压为 100、200 kPa, 在围压 100 kPa 条件下加载速率分别为 1 mm/min 和 0.07 mm/min, 在围压 200 kPa 下加载速率为 1 mm/min。

表 1 土样基本物理性质参数
Table 1 Basic physical properties parameters of soil sample

参数	风干含水率 $w/\%$	液限 W_L $/\%$	塑限 W_P $/\%$	塑性指数 I_P $/\%$	土粒相对 密度 G_s
量值	3.5	51	28	23	2.63

数值试样几何形状为一边长 50 mm 的立方体, 如图 2 所示。为模拟试样过程中不排水特征, 采用等体积法^[30]维持试验过程中试验体积恒定, 在固结过程中四周刚性墙体往试样中心移动使得试样达到指定围压值, 剪切过程中顶部和底部墙体以一定速度往试样中心运动进行剪切, 周边墙体则以一定速度远离试样中心运动, 维持剪切过程中试样体积不变。

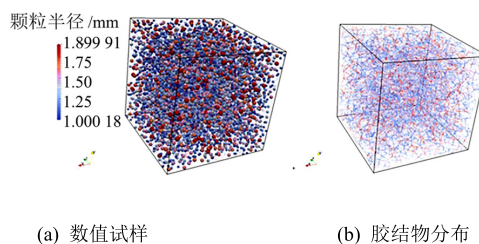


图 2 离散元数值模型

Fig.2 Numerical model of discrete element method

选用围压为 100 kPa、剪切速率为 1 mm/min 的室内试验结果进行参数标定, 采用试错法不断调整接触参数使得模拟结果与试验结果匹配, 进一步将标定所得到的参数用于另外两种试验条件下进行试验模拟, 以确定模拟参数的合理性。考虑到研究过程中主要关注颗粒体系内部相互作用所产生的宏观效应, 另为提高计算效率, 在模拟过程中忽略试样内部颗粒重力作用, 最终确定参数见表 2。最后将所标定参数用于其他工况的试验模拟, 所得数值试验结果和室内试验结果如图 3 所示。从图中可以看出, 数值试验结果和室内试验结果吻合较好, 能合理地描述胶结土应变软化特征及其率效应特征。

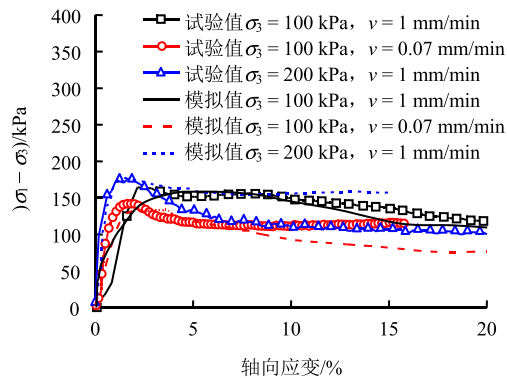
3.2 数值试验设计

为探究胶结材料微观特征-加载速率-宏观响应之间的耦合关系, 通过调整接触模型微观参数取

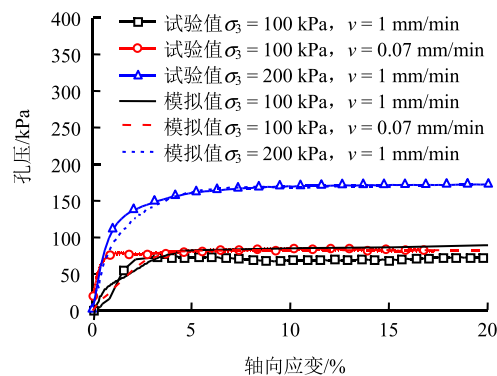
表 2 DEM 模拟参数

Table 2 Simulation parameters of discrete element method

DEM 参数	量值	DEM 参数	量值
颗粒半径 r/mm	1~2	胶结杨氏模量 E/kPa	2×10^4
颗粒密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 630	胶结泊松比 ν	0.25
法向接触刚度 $k_n/(\text{N}/\text{m})$	6×10^4	胶结内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	30
切向接触刚度 $k_s/(\text{N}/\text{m})$	5×10^4	阻尼系数	0.002
颗粒内摩擦角 $\theta/(\circ)$	30	重力加速度 $g/(\text{m}/\text{s}^2)$	0
胶结黏聚力 c/kPa	480	时间步长 $\Delta t/\text{s}$	3×10^{-6}



(a) 应力-应变



(b) 孔压-应变

图 3 数值试验与室内试验对比曲线

Fig.3 Comparison curves between numerical tests and experimental results

值反映试样微观特征的变化，并在不同微观参数条件下进行不同加载速率三轴不排水剪切试验。试样边界为刚性边界，围压均为 50 kPa，孔隙比为 1.061。为使得微观参数能充分反映天然胶结土微观结构特征，以上述人工胶结土数值模型接触参数为参考，构建得到数值试验所用离散元模型基本参数见表 2。需要说明，胶结黏聚力基础值设定为 400 kPa，进行三轴数值试验时，为在最终数值试验结果中充分反映各项微观物理指标对率效应的影响特征，采用全面析因试验设计^[32]的方法进行数值试验方案的确定。试验过程中以胶结模型中两个强度参数(胶结黏聚力和胶结内摩擦角)，一个变形模量参数(胶

结杨氏模量)、胶结数目以及孔隙比 5 个特征微观参数作为基础变量，分别设置 4 个水平值，并以单一变量为原则，在不同微观参数组合条件下分别进行 4 种加载速率(1、0.1、0.01、0.002 mm/min)条件下三轴不排水剪切数值试验，不同试验条件下围压始终为 50 kPa，试验方案见表 3。离散元数值试样生成过程中，通过设定孔隙比相关参数控制所生成试样的孔隙比；使用平行胶结模型时通过指定胶结模型施加所需最小距离控制生成试样的胶结数目^[25]。数值试验结果中的峰值强度和残余强度，为试样剪切过程中的宏观力学特征，峰值强度为剪切过程中试样最大偏应力，残余强度则为最终稳定偏应力^[33]。

表 3 数值试验方案

Table 3 Numerical simulation scheme

测试参数	量值			
胶结黏聚力 c/kPa	100	200	300	400
胶结数目 $N/\text{个}$	12 325	13 500	14 500	15 500
胶结杨氏模量 E/kPa	1×10^3	5×10^3	1×10^4	5×10^4
胶结内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	5	15	30	45
孔隙比 e	0.9	1.061	1.413	1.617

4 数值试验结果及分析

4.1 强度特征

为充分反映应力-应变曲线全过程的率相关特性，便于后续 BP 神经网络模型进行精细化预测，本文选取峰值强度、峰值强度处对应的轴向应变以及残余强度 3 个特征值进行深入讨论。由于在较低围压条件下应变率对孔压的影响较为微弱，这里不详细论述。

在试验过程中发现剪切速率对胶结材料的强度具有较为显著且规律性的影响，图 4 为不同微观参数条件下胶结材料峰值应力与剪切速率的关系。从图中可以看出，在不同微观参数模拟条件下胶结材料不排水峰值强度随着应变率的增大的而增大，且峰值强度与应变率基本呈现半对数线性关系，但各微观参数对宏观峰值强度的影响存在差异。图 4(a)和 4(b)表明，在同一剪切速率下随着胶结黏聚力和胶结数目的增加，试样峰值强度均呈现增大趋势，这是由于单个胶结黏聚力的增加或整体胶结数目的增加，试样内部整体胶结强度将得到较大的提高，故其强度得到提高。由图 4(b)中可知，在剪切速率从 0.002 mm/min 增长至 1 mm/min 条件下，胶结黏聚力为 100、200、300、400 kPa 时试样峰值强度增

量分别为 67.95、80.25、95.88、100.11 kPa。由图 4(c)和 4(d)可知,同一剪切速率下,随着胶结杨氏模量和胶结内摩擦角的增大,峰值强度反而降低。当胶结杨氏模量增大,胶结刚度增大,表现出明显脆性,更易破碎;随着内摩擦角的增大,胶结的极限拉应力逐渐减小,胶结也易于破碎,其峰值强度降低。从图 4(e)中可以看出,同一剪切速率下,当孔隙比增大,试样峰值强度降低,在剪切速率从 0.002 mm/min 增长至 1 mm/min 条件下孔隙比为 0.9、1.061、1.413、1.617 时试样峰值强度增量分别为 137.83、100.11、63.96、60.21 kPa,表明当孔隙比增大时试样内部孔隙变大,更易于产生附加变形,颗粒之间更易相互错动从而导致胶结易于破碎。图

5 为不同微观参数条件下应变率与峰值强度处轴向应变的关系曲线。从图中可以看出,不同条件下达到峰值强度时其应变均较小,多在 5%以内,随着应变率的增加,峰值强度处应变呈现略微增加趋势,其增量多在 3%以内。对比不同微观参数,胶结杨氏模量对峰值强度处应变的影响较为显著,随着胶结杨氏模量的增大,其峰值强度处应变显著减小,当杨氏模量为 1 MPa 时,峰值强度处应变随应变率的变化表现出显著变化。当应变率为 1.25、0.125、0.0125%/min 时,峰值强度处应变较高,分别为 31.24%、25.01%和 30.37%,可知当胶结杨氏模量较小时试样内部胶结难以破碎,试样整体表现为显著的弹性特征。

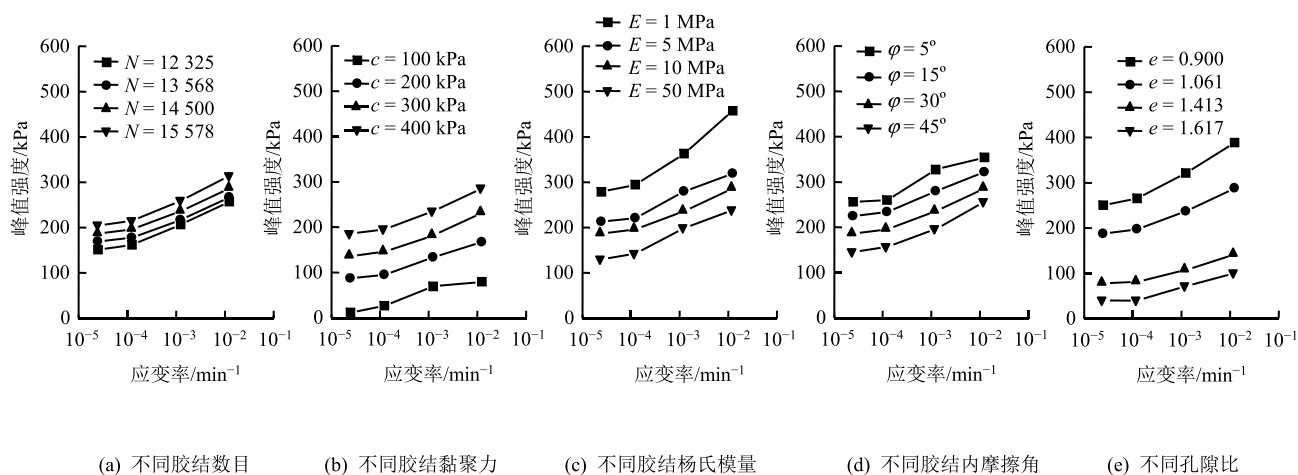


图 4 不同微观参数条件下岩土胶结材料应变率与峰值强度关系曲线

Fig.4 Relationships between strain rate and peak stress of cemented geo-materials under different microscopic parameters

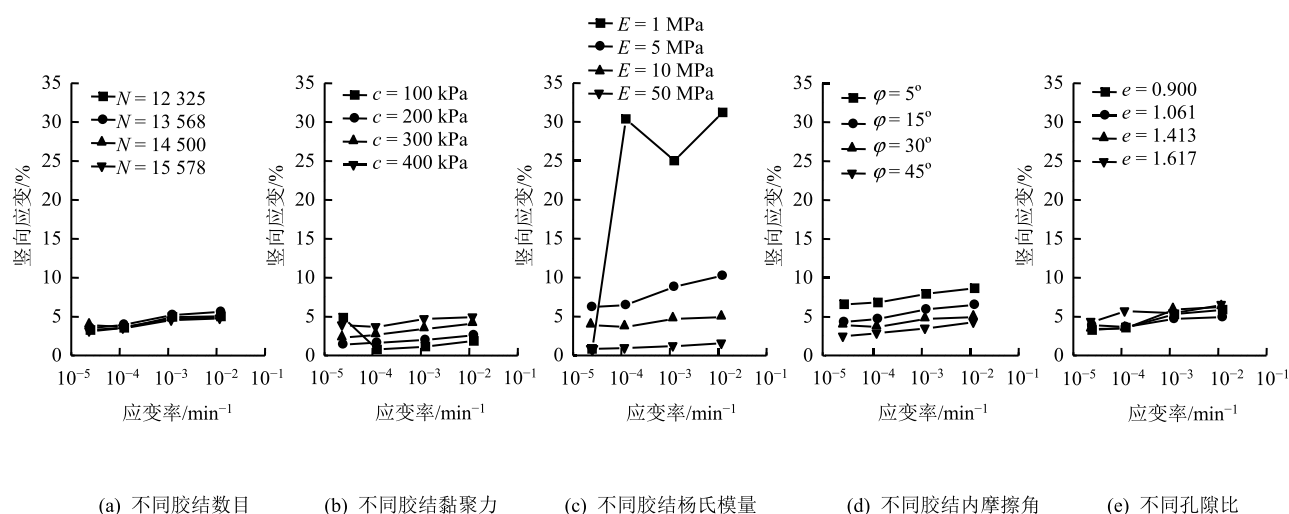


图 5 不同微观参数条件下岩土胶结材料应变率与峰值强度处应变关系曲线

Fig.5 Relationships between strain rate and peak strain of cemented geo-materials under different microscopic parameters

一般认为, 剪切速率对残余强度的影响相对较弱, 图 6 为不同微观参数条件下应变率与残余强度的关系曲线。需要说明, 当胶结杨氏模量为 1 MPa 时, 由于其内部胶结具有显著的弹性变形特征, 难以破碎, 试样整体难以达到残余强度水平, 因此未给出其残余强度取值。从图中可以看出, 不同条件下试样残余强度均集中在 50 kPa 以下, 当孔隙比较大或胶结内摩擦角较高时, 试样残余强度略有增加,

但整体仍处于 100 kPa 以内; 随着应变率的变化, 残余强度的变化较小, 多在 5 kPa 以内并未表现出显著的率敏性, 且微观接触参数的变化对其影响并不显著。这是由于在试样剪切过程中, 随着轴向应变的逐渐增大, 试样内部胶结破碎量显著增大, 胶结材料逐渐向无胶结材料转变, 因此不同外部条件作用下其最终的物理力学状态表现出一定程度的相似性。

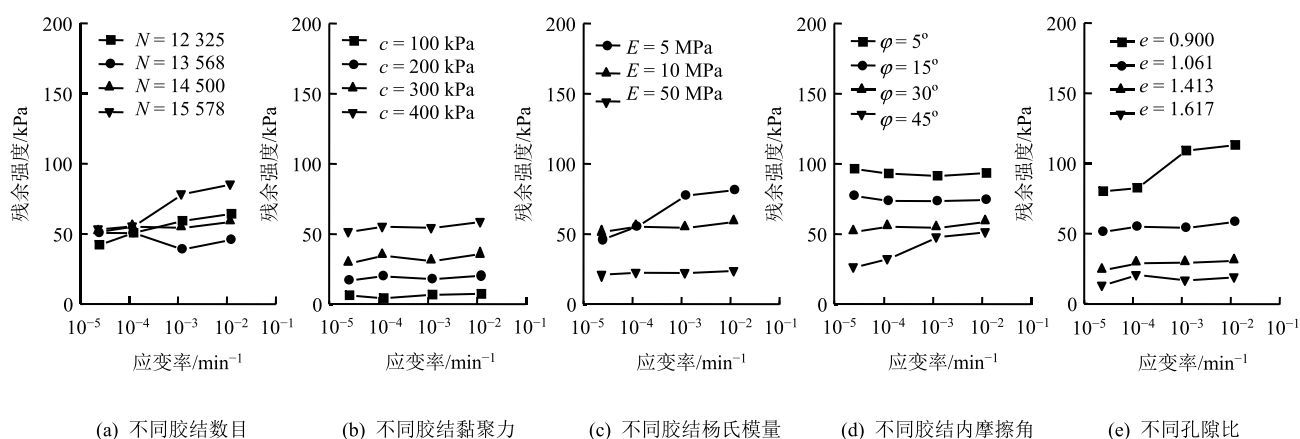


图 6 不同微观参数条件下岩土胶结材料应变率与残余强度关系曲线

Fig.6 Relationships between strain rate and residual stress of cemented geo-materials under different microscopic parameters

4.2 微观变量演化

图 7 为轴向应变达到 30% 时不同剪切速率 v 下的试样内部胶结破碎区。

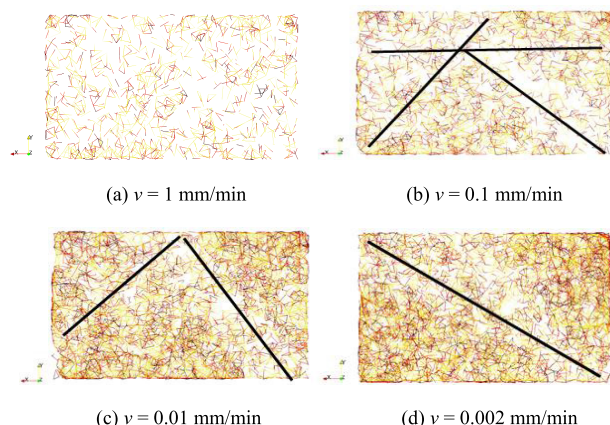


图 7 不同应变速率下胶结破碎区

Fig.7 Bond failure zones at different strain rates

从图 7 中可以看出, 不同剪切速率下, 当轴向应变达到 30% 时试样内部胶结破碎区域分布不一致, 当加载速率为 1 mm/min 时试样内部胶结剧烈, 其破碎分布较为均匀; 当加载速率为 0.1 mm/min 时试样内部胶结破碎较多, 呈现“大”字型分布, 未

形成显著的剪切带; 当加载速率为 0.01 mm/min 时其内部胶结整体破碎量减少, 且胶结破碎区域逐渐集中, 形成锥形剪切带; 当加载速率 $v = 0.002\text{ mm/min}$ 时破碎区沿试样对角线扩展形成线型剪切带, 试样呈现明显的剪切破坏特征。由此可推断, 弱胶结材料的率敏性特征与试样内部胶结的破碎率存在一定关系。

为进一步分析胶结材料率敏性特征与胶结破碎之间的关系, 以胶结黏聚力为 400 kPa 试样为例, 分析全剪切过程单位应变内的胶结平均破碎率与加载速率的关系如图 8 所示。从图中可以看出, 在剪切开始阶段, 随着偏应力的增加, 试样内部胶结均未出现破碎, 不同加载速率的条件下, 当轴向应变达到 2.4% 时胶结开始破碎; 当偏应力达到峰值时平均胶结破碎率仍呈现上升趋势, 当偏应力水平逐渐减少至残余强度时平均胶结破碎率开始呈现下降趋势。由此可知, 单位应变内的平均胶结破碎率与应力-应变曲线呈现出相似发展趋势, 均表现为软化特征, 但其软化并不同步; 当轴向应变小于 6%, 当加载速率较小时平均胶结破碎率的上升趋势较为明显, 试样内部胶结破碎量相对较大, 但就全过程而言, 平均胶结破碎率的峰值随剪切速率的增加而

增加;当加载速率 $v = 0.002 \text{ mm/min}$ 时平均胶结破碎率峰值为 2.94%,当加载速率增大至 0.01 mm/min 时其峰值增大为 3.32%,加载速率继续增大至 0.1 mm/min 时其峰值增大为 4.21%,当加载速率继续增大至 1 mm/min 时其峰值显著增加至 12.39%。

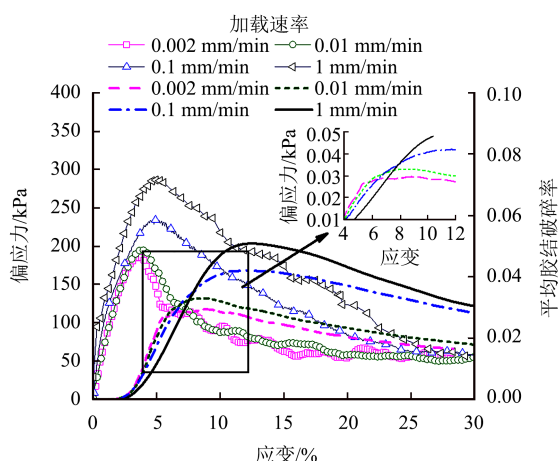


图 8 应力-应变曲线和平均胶结破碎率曲线
Fig.8 Stress-strain curves and average percentage of bond breakage curves

5 BP 神经网络模型

5.1 BP 神经网络模型的构建

神经网络模型主要包含输入层、隐含层以及输出层三部分。在数值试验中,以胶结数目 N 、胶结黏聚力 c 、胶结杨氏模量 E 、胶结内摩擦角 φ 和试样孔隙比 e 作为 5 个微观变量进行研究。在构建 BP 神经网络模型时,为将加载速率的影响反映进该神经网络模型中,利用 5 个变量以及加载速率 v 作为输入变量构建为网络模型中的输入层,在进行网络模型训练及预测时将 6 个变量通过输入层节点输入进网络模型中,另将试验结果中峰值强度、峰值强度处轴向应变以及残余强度 3 个特征变量作为输出变量构建为网络模型输出层,最终模拟预测结果将通过输出层节点进行输出。利用 Matalab 编写程序,构建 3 层 BP 神经网络模型,如图 9 所示。从图中可以看出,所建立的 BP 神经网络模型输入层节点数目为 6 个,输出层节点数目为 3 个,而隐含层节点数目为 5 个,其中隐含层节点数目可通过式 (4) 计算得到。

$$l = \sqrt{0.43mn + 2.54m + 0.77n + 0.35 + 0.12n^2} + 0.51 \quad (4)$$

式中: m 为输入层节点数目; n 为输出节点数目; l 为隐含层节点数目。

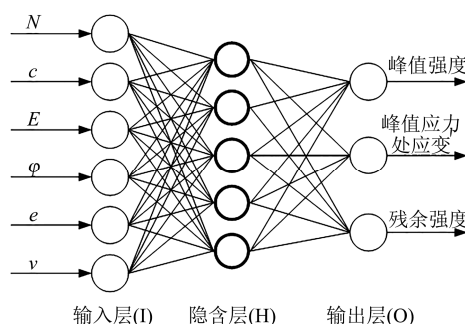


图 9 BP 神经网络模型
Fig.9 BP neural network model

利用所建立的 BP 神经网络模型进行预测前需利用已有样本数据对其进行训练,使得该模型具有记忆功能及预测能力。首先,将归一化处理后的输入层变量 I_i 输入进神经网络中,并利用初始化后的输入层与隐含层之间的连接权值 w_{ij} 、偏置 $b_j^{(h)}$ 和传递函数 $f(x)$ 计算得到隐含层输出值 h_j :

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^m w_{ij} I_i + b_j^{(h)}\right), (j=1, 2, 3, \dots, l) \quad (5)$$

式中:层间传递函数 $f(x)$ 采用 tansig 函数,其形式见式 (6)。

$$\text{tansig}(x) = 2 / (1 + \exp(-2x)) - 1 \quad (6)$$

当计算得到隐含层输出值后,利用初始化后的隐含层与输出层之间的连接权值 w_{jk} 及偏置 $b_k^{(o)}$ 进一步计算得到输出层输出值 o_k :

$$O_k = \sum_{j=1}^l (w_{jk} h_j + b_k^{(o)}), (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

当输入变量向前传播至输出层并计算得到输出值后,进一步利用全局均方误差对模型训练精度进行判断,全局均方误差可由式 (8) 计算得到。

$$ERR = \frac{1}{2S} \sum_{p=1}^S \sum_{k=1}^n (y_k^{(p)} - o_k^{(p)})^2 \quad (8)$$

式中: S 为训练样本组数; $y_k^{(p)}$ 为第 p 组样本输出变量实测值。

当训练输出值与实测值误差较大且无法达到目标精度时,则进行反向传播,利用梯度下降算法对各连接层间权值 w 和偏置 b 进行更新,直至达到目标精度,公式为

$$w = w - \alpha \frac{\partial ERR}{\partial w} \quad (9)$$

$$b = b - \alpha \frac{\partial ERR}{\partial b} \quad (10)$$

式中: α 为学习效率。

5.2 BP 神经网络模型的训练

利用上述数值试验得到的试验结果共 64 组进行样本训练, 考虑到胶结杨氏模量为 1 MPa 时数值试验无法获取其残余强度, 具有显著奇异性, 因此将该数据组剔除, 利用余下 60 组数据样本进行神经网络模型训练。考虑到峰值应力处应变和残余强度两输出变量样本数值范围较窄、不具备显著的差异性、对训练结果产生影响, 在进行模型训练前对此两输出变量进行平方运算、以拓宽其样本分布范围。此外, 为消除不同数据之间的量纲差异, 提升训练过程收敛速度, 在进行样本变量输入前对所有样本数据均进行归一化处理, 处理格式为

$$P_n = \frac{2(P - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} + 1, (P_n \in [-1, 1]) \quad (11)$$

在训练过程中目标误差设置为 0.01, 学习率为 0.01, 训练过程中误差变化如图 10 所示。从图中可见, 当训练次数达到 6.4 万次时模型误差基本达到指定误差范围, 所建立 BP 神经网络模型满足指定精度要求。

5.3 BP 神经网络模型验证

为验证构建 BP 神经网络模型预测能力的准确性与合理性, 在围压 50 kPa 条件下, 选取参数组合

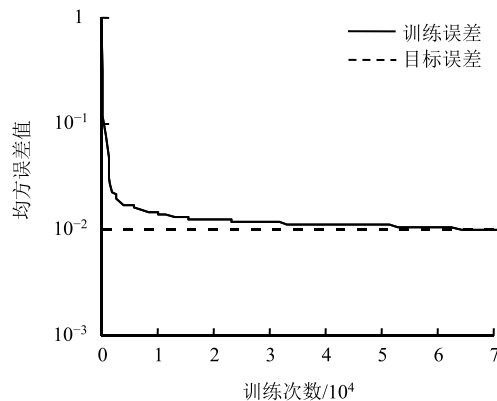


图 10 BP 神经网络模型训练过程误差变化曲线
Fig.10 The evolution of error during the training process of BP neural model

值 $[N, c, E, \phi, e] = [13\ 000\ \text{个}, 350\ \text{kPa}, 20\ \text{MPa}, 35^\circ, 1.19]$ 建立相应胶结材料离散元数值模型, 分别在加载速率 1、0.1、0.01、0.002 mm/min 的条件下进行三轴不排水试验模拟, 得到数值试验结果。此外, 同时将上述微观参数组合值输入 BP 神经网络模型进行预测, 计算得到预测结果, 最终结果见表 4。由表可知, 峰值强度处应变的预测精度稍低, 但整体而言, 所构建 BP 神经网络模型预测结果较好, 相对误差均在 10% 左右, 表明该模型既可较好地实现岩土胶结材料率效应的预测, 又可充分地反映岩土胶结材料内部微观结构特征。

表 4 测试结果校验
Table 4 Calibration of test results

结果校验	不同加载速率(mm/min)测试结果											
	峰值强度/kPa				峰值强度处应变/%				残余强度/kPa			
	1	0.1	0.01	0.002	1	0.1	0.01	0.002	1	0.1	0.01	0.002
试验值	210.65	160.82	117.42	111.89	2.38	1.93	1.54	1.48	29.48	22.76	19.79	15.91
预测值	223.58	165.10	115.58	122.83	2.62	2.19	1.71	1.29	26.55	20.62	19.03	16.95
绝对误差	12.93	4.28	-1.84	10.94	0.24	0.26	0.17	-0.19	-2.93	-2.14	-0.76	1.04
相对误差/%	6.14	2.66	1.57	9.78	10.08	13.47	11.04	12.84	9.94	9.40	3.84	6.54

6 结 论

(1) 不同微观参数条件下胶结材料均有较为显著的率敏性, 随着加载速率的增大, 试样峰值强度增大, 且呈现半对数线性关系, 但加载速率对试样残余强度的影响并不显著, 随加载速率的增大, 残余强度的变化多在 5 kPa 以内。

(2) 在剪切全过程中单位应变内平均胶结破碎率变化趋势与偏应力变化趋势一致, 均呈软化特征, 但两者在演化趋势上并不同步, 相比偏应力, 胶结破碎率峰值出现较晚, 剪切初期偏应力虽然持续增

长, 但试样内部胶结并未破碎。胶结材料率敏性特征由其内部胶结破碎引起, 随着加载速率的增大, 试样单位应变内平均胶结破碎率呈现增大趋势。

(3) 以数值试验为基础所构建的 BP 神经网络模型能有效地反映微观特征-加载速率-宏观响应三者之间的联系, 通过数值试验进行验证, 得到试验结果与预测结果相对误差均在 10% 左右, 表明 BP 神经网络算法能有效地应用于胶结材料率效应预测计算中。

参 考 文 献

- [1] 蒋明镜, 张伏光, 孙渝刚. 3 种胶结岩土材料本构模型

- 中破损规律的离散元验证[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 805—813.
- JIANG Ming-jing, ZHANG Fu-guang, SUN Yu-gang. Numerical evaluation of degradation evolutions in three constitutive models for bonded geomaterials by distinct element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(5): 805—813.
- [2] 旷杜敏, 龙志林, 周益春, 等. 珊瑚礁岩土材料的物理力学性能研究综述[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 108—126.
- KUANG Du-min, LONG Zhi-lin, ZHOU Yi-chun, et al. A review of the physical and mechanical properties of coral reef[J]. **Journal of Xiangtan University(Natural Science)**, 2018, 40(5): 108—126.
- [3] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2610—2615.
- YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Influence of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl. 1): 2610—2615.
- [4] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235—1240.
- CAI Yu, KONG Lin-wei, GUO Ai-guo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1235—1240.
- [5] ENOMOTO T, KOSEKI J, TATSUOKA F, et al. Rate-dependent behavior of undisturbed gravelly soil[J]. **Soils and Foundations**, 2016, 56(3): 547—558.
- [6] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Géotechnique**, 1991, 41(2): 281—284.
- [7] LIANG C Y, ZHANG Q B, LI X, et al. The effect of specimen shape and strain rate on uniaxial compressive behavior of rock material[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2016, 75(4): 1—13.
- [8] HOKKA M, BLACK J, TKALICH D, et al. Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2016, 91: 183—193.
- [9] 王洪亮, 范鹏贤, 王明洋, 等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1340—1346.
- WANG Hong-liang, Fan Peng-xian, WANG Ming-yan, et al. Influence of strain rate on progressive failure process and characteristic stresses of red sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1340—1346.
- [10] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31—35.
- CHEN Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Compression and shear test of structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 31—35.
- [11] 蒋明镜, 吴迪, 曹培, 等. 基于SEM图片的钙质砂连通孔隙分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 1—5.
- JIANG Ming-jing, WU Di, CAO Pei, et al. Connected inner pore analysis of calcareous sands using SEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(Suppl. 1): 1—5.
- [12] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于SEM和MIP试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406—412.
- ZHANG Xian-wei, KONG Lin-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 406—412.
- [13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(30): 331—336.
- [14] 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.
- [15] JIANG M, YU H S, LEROUEIL S. A simple and efficient approach to capturing bonding effect in naturally microstructured sands by discrete element method[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2007, 69(6): 1158—1193.
- [16] LIAKAS S, OSULLIVAN C, SAROGLOU C. Influence of heterogeneity on rock strength and stiffness using discrete element method and parallel bond model[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2017, 9(4): 575—584.
- [17] FENG K, MONTOYA B M, EVANS T M. Discrete element method simulations of bio-cemented sands[J]. **Computers and Geotechnics**, 2017, 85: 139—150.
- [18] 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 Guo-bin, DAI Bin, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(7): 1491—1498.
- [19] YANG Bu-dong, JIAO Yue, LEI Shu-ting. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles[J]. **Engineering Computations**, 2006, 23(6): 607—631.
- [20] 张学朋, 蒋宇静, 王刚, 等. 基于颗粒离散元模型的不同加载速率下花岗岩数值试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2679—2686.
- ZHANG Xue-peng, JIANG Yu-jing, WANG Gang, et al. Numerical experiments on rate-dependent behaviors of granite based on particle discrete element model[J] **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1340—1346.
- [21] 李建乐, 郑参, 颜港, 等. 不同加载条件下的煤岩体压缩试验模拟研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(1): 17—20.
- LI Jian-le, ZHENG Shen, YAN Gang, et al. Simulation research on coal-rock compression tests under different loading conditions[J]. **Safety in Coal Mines**, 2018, 49(1): 17—20.
- [22] 颜敬, 曾亚武, 高睿, 等. 无黏结材料颗粒流模型的宏观细观参数关系研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 45—50.
- YAN Jing, ZENG Ya-wu, GAO Rui, et al. Relationship between macroscopic and mesoscopic parameters in particle flow model of unbonded material[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2012, 29(5): 45—50.
- [23] 李澄清, 刘天为, 张海洋, 等. 基于 BP 神经网络的土体细观力学参数反演分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 609—615.
- LI Cheng-qing, LIU Tian-wei, ZHANG Hai-yang, et al. Back-analysis on micromechanical parameters of soil mass using BP neural network[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2015, 23(4): 609—615.
- [24] 张楠, 王亮清, 葛云峰, 等. 基于因子分析的 BP 神经网络在岩体变形模量预测中的应用[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 87—95.
- ZHANG Nan, WANG Liang-qing, GE Yun-feng, et al. Application of BP neural network based on factor analysis to prediction of rock mass deformation modulus[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(1): 87—95.
- [25] WANG Y, ABE S, LATHAM S, et al. Implementation of particle-scale rotation in the 3D lattice solid model[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 2006, 163(9): 1769—1785.
- [26] WANG Y, TONON F. Dynamic validation of a discrete element code in modeling rock fragmentation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(4): 535—545.
- [27] ZHAO T, CROSTA G B, UTILI S, et al. Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3-D discrete element analyses[J]. **Journal of Geophysical Research Earth Surface**, 2017, 122(3): 678—695.
- [28] SHIMIZU H, KOYAMA T, ISHIDA T, et al. Distinct element analysis for class II behavior of rocks under uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 323—333.
- [29] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29: 331—336.
- [30] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Géotechnique**, 1991, 41(2): 281—284.
- [31] GUO N, ZHAO J D. Local fluctuations and spatial correlations in granular flows under constant-volume quasistatic shear[J]. **Physical Review E**, 2014, 89: 042208-1—042208-16.
- [32] 李云雁. 试验设计与数据处理(第2版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- LI Yun-yan. Experiment design and data processing (second edition)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [33] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- China Academy of Transportation Science. JTG E40-2007 Test methods of soil for highway Engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.