

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1802

法向应力作用下砂岩错位裂隙变形行为研究

李 博¹, 崔逍峰¹, 莫洋洋¹, 邹良超², 伍法权¹

(1. 绍兴文理学院 岩石力学与地质灾害浙江省重点实验室, 浙江 绍兴, 312000;

2. 瑞典皇家理工学院 可持续发展与环境工程系, 斯德哥尔摩 瑞典)

摘 要: 受地质活动影响, 天然裂隙往往存在不同程度的变形错位, 对此类裂隙在法向应力作用下的变形行为尚缺乏定量的描述和评价, 文献中经典裂隙变形模型的适用性尚未得到试验和数值模拟的验证。通过法向加载试验和弹塑性接触数值计算研究了具有不同错位的砂岩裂隙在法向应力作用下的变形破坏行为。采用经典的双曲线模型、统一指数模型和对数模型拟合了应力-位移曲线, 确定了模型中参数的变化规律。结果表明: 试验得到的应力-位移曲线与塑性破坏区域与数值计算结果基本吻合, 验证了自主开发的弹塑性接触计算程序的可靠性; 双曲线模型和对数模型在应力水平较小的阶段与数值计算结果存在较大偏离, 而统一指数模型通过引入系数 n , 能够较好地匹配整个加载过程中的应力-位移关系; 模型中的最大闭合量 $V_{\max}$ 与裂隙最大开度正相关, 初始法向刚度 K_{ni} 与岩石弹性模量正相关, 与裂隙表面粗糙度和错位率负相关, 系数 n 与裂隙表面粗糙度和错位率正相关; 基于上述规律建立了针对 $V_{\max}$ 、 K_{ni} 和 n 的预测公式, 预测结果与试验结果吻合良好。

关 键 词: 岩石裂隙; 法向应力; 法向位移; 错位; 弹塑性接触

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 07-1850-11

Deformation behavior of dislocated sandstone fractures subject to normal stresses

LI Bo¹, CUI Xiao-feng¹, MO Yang-yang¹, ZOU Liang-chao², WU Fa-quan¹

(1. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;

2. Department of Sustainable Development and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden)

Abstract: Subject to geological processes, natural rock fractures can be dislocated to some extent, and the normal deformation behavior of such dislocated fractures has not been quantitatively estimated, and the applicability of classic deformation models has not been verified against experiments and numerical simulations. The deformation and failure behavior of dislocated sandstone fractures were studied via compression tests and elastic-plastic contact simulations. The obtained stress-displacement curves were fitted by a hyperbolic model, an exponential model and a logarithmic model, respectively and the coefficients involved in these models were estimated. The results show that the experimentally and numerically obtained stress-displacement curves agree well with each other, and the surface damage areas are also consistent, which verified the reliability of the elastic-plastic contact model. The hyperbolic and logarithmic models do not fit the curves well under relatively low stress levels, while the exponential model well accommodates the simulation results in the whole loading process by introducing a coefficient n . The maximum closure $V_{\max}$ is positively correlated with the maximum local aperture, the initial normal stiffness K_{ni} is positively correlated with the elastic modulus and negatively correlated with the fracture roughness and dislocating ratio, and n is positively correlated with the fracture roughness and dislocating ratio. A model was established to predict the three coefficients, and the prediction values agree well with the experimental results.

Keywords: rock fracture; normal stress; normal displacement; dislocation; elastic-plastic contact

1 引 言

深入地理解多场耦合作用下裂隙岩体的基本

变形特性是高放废物地质处置、地热开发等众多深部地下工程安全建设与生产运营的基础^[1]。天然岩石裂隙在法向应力作用下的变形会改变其内部空腔

收稿日期: 2020-12-01

修回日期: 2021-04-07

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LR19E090001); 国家自然科学基金资助项目 (No. 42011530122, No. 42077252)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LR19E090001) and the National Science Foundation of China (42011530122, 42077252).

第一作者简介: 李博, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 主要从事岩体力学耦合特性方面的研究工作。E-mail: libo@usx.edu.cn

通讯作者: 邹良超, 男, 1987 年生, 博士后, 主要从事岩体多场耦合特性方面的研究工作。E-mail: lzo@kth.se

的几何形态,影响流体在裂隙中的流动特性,进而改变岩体的传热、传质等基本性质^[2-3]。因此,定量分析法向应力作用下裂隙的变形破坏行为对理解裂隙岩体的多场耦合特性具有重要的意义^[4]。

近几十年来,学者们对法向应力作用下岩石裂隙的变形行为已开展了广泛的试验和理论研究,对其基本规律已有了较为深入的认识。在早期,Goodman^[5]和 Bandis 等^[6]根据试验数据建立了法向应力与法向位移之间的经验关系。Goodman^[5]通过对裂隙法向变形试验数据的分析,认识到裂隙的最大闭合度应当小于裂隙间的最大开度;随着法向应力的增加,裂隙闭合量呈非线性变化,该非线性可以用双曲线模型拟合。这种非线性关系,被 Pratt 等^[7]和 Iwai^[8]在之后的研究中证实。Bandis 等^[6]进一步分析试验数据,与 Barton 等^[9]共同修正了 Goodman 模型,建立了一种新的双曲线模型(以下简称 BB 模型)。该模型包含了最大闭合量和初始刚度两个控制参数,可以较好地拟合裂隙的试验数据。Malama 等^[10]通过法向加载试验发现 BB 模型预测结果与试验数据在应力较小时容易产生偏离,为此引入参数 n 建立了统一指数模型,通过对 n 的调节可以取得更好的拟合效果。俞缙等^[11]引入半值应力的概念,改进了裂隙法向变形本构关系,并通过与试验数据的对比验证了改进模型的可靠性。荣冠等^[12]采用柔度变形法建立了预测裂隙法向变形的两个本构模型,并初步分析了模型参数的取值范围及相关地质影响因素。这些经验模型为岩石裂隙变形特性评价提供了有用的方法,然而,天然裂隙受到各种地质活动的影响,其表面并不一定处于完全咬合的状态。上述模型大部分针对的是未发生错位的裂隙,对错位裂隙的应用效果尚未得到充分论证。

在裂隙受压变形的数值计算方面,一般采用 Hertzian 接触理论,通过对裂隙表面接触体的弹性计算来获取整个裂隙的应力-变形关系^[13]。Greenwood-Williamson (GW) 模型是早期的一个经典模型,可用于定量分析随机粗糙表面之间的弹性接触问题^[14]。Brown 等^[15]将 GW 模型推广应用到粗糙岩石裂隙表面的接触,并通过试验进行了验证。Matsuki 等^[16]在 GW 模型中引入蠕变参数,考虑了裂隙接触变形的时间效应。GW 模型忽略了相邻粗糙接触区域之间的相互作用,对非接触区域变形的计算精度偏低。Hopkins^[17]提出了一种基于两个表面微小凸体之间接触力平衡的数值模拟方法,考虑了单个接触对周围区域的影响,采用不同高度的圆柱表示微凸体的几何形貌,其受力变形可以用圆柱体

的高度变化表示,因而具有较高的精度和计算效率。然而,该方法在几何上的简化丧失了物理上的严谨性,且不易考虑塑形破坏的影响。相比之下,利用 Boussinesq 解将接触应力与半无限体表面上的变形相关联的方法是在物理上更有效的一种接触算法,该方法能够考虑局部塑性变形,在岩石裂隙受压变形模拟方面得到了初步的应用^[18-19]。大量的试验研究表明,裂隙表面接触上的应力集中会导致接触体的破坏,从而显著地改变裂隙的表面形貌以及变形特性^[20]。随着错位量的增加,裂隙中的接触面积变小,应力集中造成的表面破坏更为突出。因此,有必要在弹性模型的基础上考虑裂隙表面接触的破坏,从而更准确地反映错位裂隙的变形行为。

裂隙法向变形本构模型中的参数与裂隙面的几何特征直接相关,为了有效预测岩石裂隙的法向变形特性,需要建立这些参数与裂隙面几何参数之间的关系。Bandis 等^[6]尝试用粗糙度系数 JRC 来表征裂隙表面特性,然而由于 JRC 值自身的局限性,其建立的预测公式缺乏普适性,未能得到其他研究的验证和广泛应用;同时, Bandis 等^[6]还指出 BB 模型一般只适用于充分咬合的裂隙,对于错位裂隙,采用对数函数的拟合效果更好,然而该函数中的参数不仅物理意义不明确,也缺乏可靠的取值方法。Lee 等^[21]针对具有不同错位量的系列裂隙开展弹性接触计算,讨论了几种经验模型中参数的变化规律,然而未能建立这些参数与裂隙几何参数之间的关系。

针对上述问题,本研究采用一种改进的弹塑性接触模型计算具有不同错位量的裂隙在法向应力作用下的变形特性,并对砂岩的法向加载试验进行了对比验证;用 BB 模型、对数模型和统一指数模型拟合试验得到的应力-位移曲线,得到参数的变化规律;统计裂隙表面特征,建立模型中的参数与裂隙力学、几何参数之间的定量关系,从而为错位裂隙变形特性评价提供一种高效精确的方法。

2 常用本构模型

2.1 BB 模型

Bandis 等^[6]通过对试验数据的分析发现在法向应力作用下岩石裂隙的法向应力-位移曲线符合双曲线函数,具有以下基本形式:

$$\sigma_n = \frac{\Delta V_j}{a - b\Delta V_j} \quad (1)$$

式中: σ_n 为法向应力; ΔV_j 为裂隙闭合量; a 和 b

为两个拟合系数。当 σ_n 趋向于一个无限大的值时, ΔV_j 趋于极限值 a/b , 即裂隙达到最大闭合量 $V_{\max}$ 。当达到该闭合量时, 裂隙内可压缩的空隙完全闭合, 含裂隙块体的变形特性与完整块体一致。

裂隙的法向刚度 K_n 不能由单个值定义。对于每个 σ_n 的增量, 相应的 K_n 值须从式 (1) 中求导得到, 可写为

$$K_n = \frac{\Delta \sigma_n}{\Delta V_j} = \frac{a}{(a - b \cdot \Delta V_j)^2} \quad (2)$$

当闭合量达到 $V_{\max}$ 时, 裂隙刚度将接近于无限大; 对于 σ_n 的一个极小增量, 即 $\Delta \sigma_n$ 趋于 0, ΔV_j 也会趋于 0, 此时的刚度为

$$K_n = \frac{1}{a} = K_{ni} \quad (3)$$

式中: K_{ni} 为裂隙初始法向刚度。

2.2 统一指数模型

Malama 等^[10]对含有单裂隙的闪长岩和花岗岩试样进行法向加载试验, 整理结果后发现: BB 模型的预测曲线在应力值处于较低水平阶段时与试验曲线存在较大的偏差^[22]。为此, 引入半值应力的概念, 即裂隙的闭合量达到裂隙最大闭合量一半时对应的应力, 记作 $\sigma_{1/2}$ ^[10], 从而把 BB 模型调整为带有 $\sigma_{1/2}$ 的形式:

$$\Delta V_j = V_{\max} \left[1 - \exp \left(-\frac{\sigma_n}{\sigma_{1/2}} \ln 2 \right) \right] \quad (4)$$

并对 $\sigma_n / \sigma_{1/2}$ 项添加幂 n , 提出了统一指数模型:

$$\Delta V_j = V_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[\left(-\frac{\sigma_n}{\sigma_{1/2}} \right)^n \ln 2 \right] \right\} \quad (5)$$

与最大闭合量 $V_{\max}$ 类似, 幂 $n \in (0, 1]$ 是体现裂隙面几何特征的参数。

由于 $K_{ni} = \sigma_{1/2} / V_{\max}$, 式 (5) 可以变形为

$$\Delta V_j = V_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{\sigma_n}{K_{ni} V_{\max}} \right)^n \ln 2 \right] \right\} \quad (6)$$

统一指数模型可利用幂 n 对应力-位移曲线中的法向刚度值即曲线的曲率进行调整, 从而与试验加载曲线有更高的匹配度, 然而 n 的取值方法仍不明确。

2.3 对数模型

Bandis 等^[5]进一步发现, σ_n 经过对数化后与错位裂隙的闭合量 ΔV_j 存在较好的线性关系, 其表达式为

$$\lg \sigma_n = p + q \cdot \Delta V_j \quad (7)$$

式中: p 和 q 为两个拟合系数。也可写为

$$\Delta V_j = \frac{\lg \sigma_n - p}{q} \quad (8)$$

该模型存在一定的数学缺陷, 即当应力很小时, ΔV_j 可变为负值, 参数的物理意义亦不明确, 因此只能作为一个单纯的拟合模型。

3 试验方法

3.1 试样准备

本研究采用细粒砂岩和中粒砂岩作为研究对象, 试样分别采自于湖南省两处大型砂岩矿山内部。细粒砂岩呈褐红色, 以粒度 $<0.25 \sim 0.05$ mm 的细砂为主, 主要由石英 (60%)、长石 (25%)、岩屑 (15%) 组成; 中粒砂岩呈灰色, 以粒度 $<0.50 \sim 0.25$ mm 的中砂为主, 主要由石英 (86%)、长石 (2%)、岩屑 (12%) 组成。准备一系列直径为 5 cm、高度为 10 cm 的标准圆柱形试样, 在 MTS815 系统上按照 ISRM 建议的岩石材料单轴抗压强度 UCS 和变形测定方法进行单轴压缩试验。试验结果如表 1 和表 2 所示。细粒砂岩相较于中粒砂岩更为致密, 具有较大的强度和弹性模量。同类岩样之间的力学性质差异较小, 表明所选岩石样品力学性质较为稳定, 有利于试验的重复验证。

表 1 细粒砂岩试样的力学性质
Table 1 Mechanical properties of fine-grained sandstone samples

试样	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
1	69.06	14.74	0.26
2	70.25	14.71	0.31
3	75.71	14.57	0.35
平均值	71.67	14.67	0.31

表 2 中粒砂岩试样的力学性质
Table 2 Mechanical properties of medium-grained sandstone samples

试样	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
1	34.92	9.86	0.33
2	23.83	9.44	0.31
3	33.49	9.21	0.29
平均值	30.75	9.50	0.31

从一整块均质的细粒砂岩岩石中切割制备 4 个边长为 8 cm 的立方体试样, 依次标记为 B1~B4, 如图 1 所示。

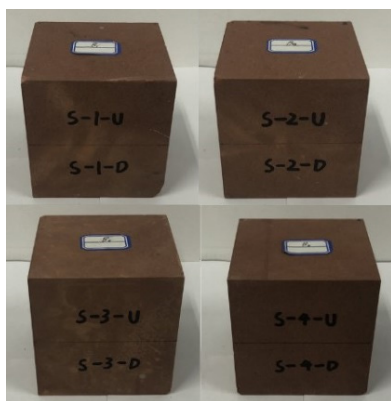


图 1 细粒砂岩立方体试样

Fig.1 Cubic samples of fine-grained sandstone

在万能材料试验机上将试样沿中心线劈裂成体积几乎相同的两半，分别标记为上、下表面。随后用分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 的高精度三维光学轮廓仪 Keyence VR3000 测量每个试样的裂隙表面，并将扫描得到的裂隙表面数据转换成点间距为 $0.1\ \text{mm}$ 的高精度点云数据。由于新鲜裂隙上下表面几何形状基本相同，这里仅展示裂隙的下表面几何形状，如图 2 所示。可见 4 个试样表面的几何形貌各异，但具有相似的起伏特征。完成压缩试验后再次扫描裂隙表面以计算由压缩试验引起的裂隙表面凸体的形貌变化。针对常用的 JRC 值只能描述二维曲线粗糙度的缺陷，本研究引入三维粗糙度参数 Z_2^{3D} 值^[23]，以精确地描述岩石裂隙的几何形貌特征，公式如下：

$$Z_2^{3D} = \sqrt{\frac{1}{(N_x - 1)(N_y - 1)} \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \left[\left(\frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} \right)^2 + \left(\frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{y_{i,j+1} - y_{i,j}} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

式中： N_x 和 N_y 分别为面域 x 和 y 方向上的点个数； $z(x, y)$ 为岩石表面点云数据中的 z 坐标值。该参数是常用参数 z_2 的三维版本，可较为全面地反映裂隙表面的三维粗糙度特征。图 1 所示 4 个细粒砂岩的 Z_2^{3D} 值分别是 0.33、0.37、0.34 和 0.35， Z_2^{3D} 值相对接近，表明均质砂岩在相同条件下劈裂生成的裂隙面具有相似的粗糙度特征。

3.2 裂隙法向加载试验

劈裂制备的裂隙上下表面具有非常高的匹配度，代表了裂隙表面充分咬合的情况。然而，由于滑移等地质作用，天然岩石裂隙往往存在不同的错位，强烈影响其力学性质。为了反映天然错位裂隙的特征，本研究在岩石裂隙法向加载试验中通过错位形成了一系列的裂隙。如图 3 所示，对于 B1~

B4 这 4 个试样，施加的错位量分别为 2、4、6、10 mm。

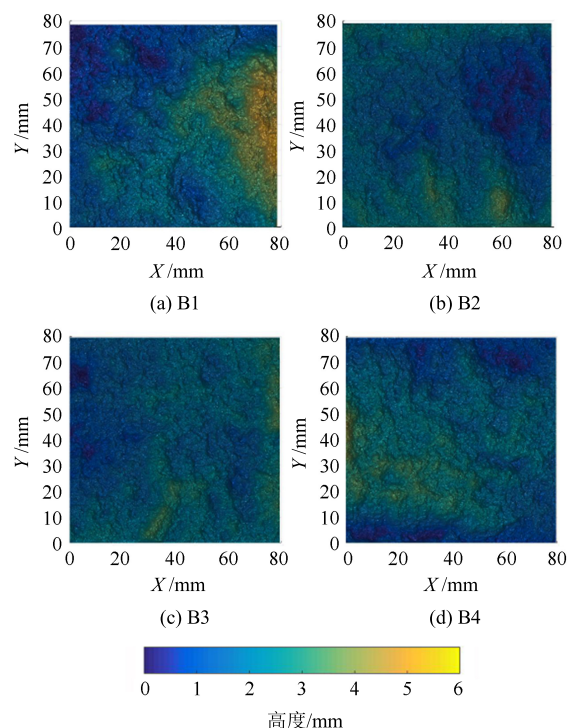
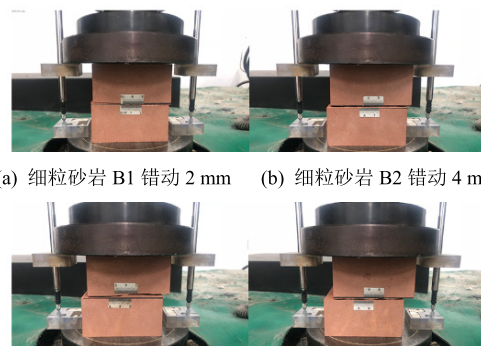


图 2 细粒砂岩裂隙下表面几何形貌

Fig.2 Morphology of the lower surfaces of fine-grained sandstone fractures



(a) 细粒砂岩 B1 错位 2 mm (b) 细粒砂岩 B2 错位 4 mm
(c) 细粒砂岩 B3 错位 6 mm (d) 细粒砂岩 B4 错位 10 mm

图 3 错位岩石裂隙单轴压缩试验

Fig.3 Unconfined compression test on dislocated rock fractures

以 $0.1\ \text{mm/min}$ 的速率对错位的试样进行法向加载直至达到目标应力值，之后按同样的速率卸载至应力值归零。在上下加压板之间安装了两个精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 LVDT，用于测量试样左右两侧的法向位移值。经不同大小的错位后，由于接触状态的变化每个试样所能承受的最大应力值也不同。在错位移较小时，裂隙表面的咬合度依然较高，此时试样仍能承受较大的应力；随着错位量的增大，试样所能承受的应力逐渐降低。因此，将 B1 和 B2 的最大加载应力设定为 $20\ \text{MPa}$ ，B3 和 B4 设定为 $10\ \text{MPa}$ 。

加载试验完成后,即可获得完整的法向应力-位移曲线。需要注意的是, LVDT 所测得的法向变形为总位移量,其中除了裂隙的净闭合量之外,还包含了岩石块体的压缩变形量。因此,在劈裂之前,对完整的岩石试样进行同样的加载试验,以获得完整试样的应力-位移曲线。将裂隙试样的试验曲线减去完整试样的试验曲线,即可得到裂隙净闭合量与法向应力之间的关系。

4 数值模拟方法与验证

4.1 裂隙表面接触计算模型

基于接触力学变分原理框架^[14],以接触系统的最小势能为基础,基于 MATLAB 编制了裂隙表面接触的弹塑性计算模型。该程序利用 Boussinesq 解将接触应力与半无限体表面上的位移相关联,模拟裂隙表面接触体的弹性变形和弹塑性变形破坏过程。

对于两个弹塑性粗糙表面的接触问题,Tian 等^[24]基于接触力学的变分原理给出了总互补势能 V^* 的表达式:

$$V^* = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \sigma_n \bar{u}_z(x, y) dx dy - \iint_{\Omega} \sigma_n \bar{u}_z^*(x, y) dx dy \quad (10)$$

式中: Ω 为接触域; $\bar{u}_z(x, y)$ 为接触区域内的复合表面法向位移; $\bar{u}_z^*(x, y)$ 为基于几何干涉的假定接触区域内两个接触凸体的总位移。

假设裂隙表面凸体为完全弹塑性材料,且塑性变形限制在局部小区域内,可以将弹性接触模型推广到弹塑性接触分析中。在这种情况下,将塑性变形引起的能量耗散添加到总余能上^[24],记为

$$V^* = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \sigma_n \bar{u}_z(x, y) dx dy - \iint_{\Omega} \sigma_n \left[\bar{u}_z^*(x, y) - \frac{1}{2} \Delta u_z^p(x, y) \right] dx dy \quad (11)$$

式中: Δu_z^p 为接触应力达到岩石基质硬度 H 时(即 $\sigma_n > H$),塑性变形区域的复合增量表面位移。计算中用到的参数包括弹性模量、泊松比和硬度,其中硬度根据文献中与单轴抗压强度的关系式计算获取^[19]。本方法充分考虑了接触体的变形破坏行为,并通过与花岗岩裂隙压缩试验的对比验证了其有效性。详细的计算原理和验证过程参见 Zou 等^[23]。本研究通过试验进一步验证其对砂岩的适用性。

在数值计算中,固定裂隙的下表面模型,将上表面依照试验进行错位后,按照 0.1 mm 的间距划分矩形网格,以精确表现岩石表面的几何特征,确保数值计算的精度^[24]。将表 1 和表 2 所示的基本力

学参数输入程序,按照 $\Delta \sigma_n = 0.1$ MPa 逐步加载。在每个单元上利用 Boussinesq 解建立应力与位移的关系,计算每个应力步长对应的各个单元上的变形。如果某单元上的应力超过岩石硬度,则判断该单元发生破坏。记录每个步长上发生的弹性及塑性变形量,累积得到裂隙表面的总变形量。

需要注意的是,试验和数值计算中的错位采用的是人工移动的方式,而实际的裂隙错位是在压剪作用下产生的。压剪作用下裂隙表面凸体会产生损伤破坏,此时凸体的弹性模量和泊松比也会产生显著变化。如果采用完整岩石的参数对剪切后的裂隙进行法向应力作用下的变形计算将产生较大偏差。因此,本研究采用人工错位的方法保持裂隙表面不受损,可以用完整岩石的参数进行受压计算,得到与试验匹配的结果。针对实际压剪作用下裂隙的变形计算是今后研究的重点。

4.2 裂隙表面接触计算模型的验证

图 4 展示的是试验和数值计算得到的应力-位移曲线对比(试验数据以红色圆点表示,数值模拟结果以绿色曲线表示)。结果表明,随着法向应力的增大,法向位移也逐步增大,而增大速率则逐渐降低。这些非线性特征与 Brown^[25]、Bandis^[6]等先前研究的结论一致。随着两个表面的逐渐逼近,裂隙面上的接触面积增大,从而增强裂隙的刚度,相同应力增量对应的位移增量逐渐降低,导致了加载曲线的非线性。如仅考虑接触体的弹性变形,也可以得到类似的非线性曲线。然而,基于纯弹性模型的计算不考虑接触体的破坏,往往会低估法向位移值,如图 4 的计算结果也得到了类似的趋势。对于错位裂隙来说,裂隙面间的接触多为尖状的微凸体,应力集中在这些微凸体上,在较小的法向应力下即可导致微凸体的破坏。本研究所采用的弹塑性计算模型充分考虑了单裂隙受压过程中产生的局部破坏,在错位 2、4、6 mm 的 3 组试验中弹塑性数值计算曲线与加载试验曲线吻合良好,验证了弹塑性接触模型的有效性。分析错位 10 mm 的曲线可知,在应力水平较小阶段,数值计算曲线与试验曲线吻合较好;随着应力的不断增加,试验测得的法向位移量较数值计算产生的位移量偏大。这是因为试块上下表面错位 10 mm 后,裂隙表面之间的咬合度大大降低,应力集中在很小的接触区域,致使试样边缘产生劈裂破坏,导致整体位移量的增加。而数值计算中假设试样整体完整,破坏只发生在接触体上,因而与试验位移量产生了偏差。此外,由于此时接触较为集中,因此单个接触上可能发生更大的变形破

坏, 由于岩石的脆性特征, 破坏形态具有随机性, 也是造成试验与数值模拟偏差的原因之一。

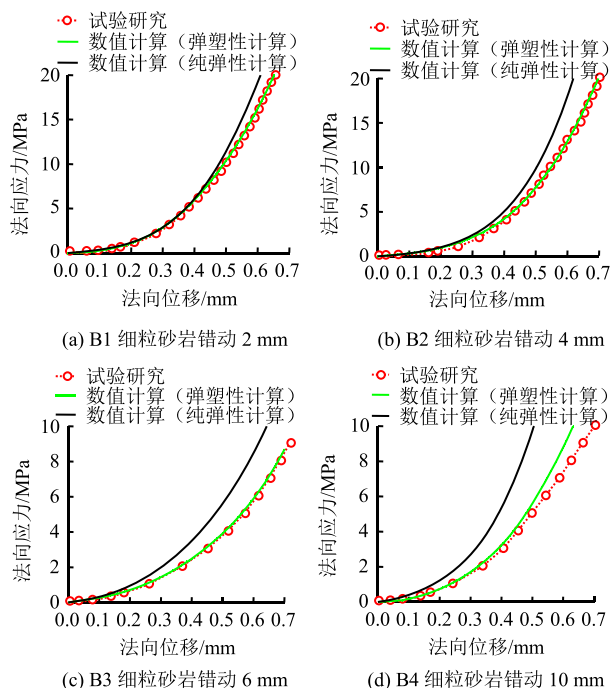


图4 数值计算与试验测量得到的应力-位移曲线对比
Fig.4 Comparison of stress-displacement curves obtained from numerical simulation and experiment

试验结束后, 可以观察到裂隙表面有粉末状的岩石颗粒, 表明有部分接触微凸体在加载过程中被压碎。仔细清理掉这些颗粒, 再用三维轮廓仪扫描表面, 得到试验后的裂隙表面几何形貌。在同一高斯坐标系中将试验前后裂隙表面的点云数据相减, 即可得到试验产生的破坏区域。提取数值计算得到的塑性变形量绘制成高程图像, 与试验测量的破坏区域进行对比, 如图5所示。

由图可知, 接触面积 C_a 随着错动位移的增大而降低, 应力更为集中, 导致破坏集中在几个大的接触面上。整体来看, 计算得到的表面破坏空间分布与测量得到的破坏区域吻合较好。试验中的破坏区域面积整体略微偏大, 这是由于岩石是脆性材料, 接触体的破坏会造成周围颗粒的开裂或松动, 造成破坏区域的扩大, 而数值计算则只考虑接触面上的破坏。

上述结果表明, 即使在较低的应力水平下, 错位裂隙表面也会产生显著的破坏, 因此, 考虑弹塑性变形的数值分析更具有实际意义, 其计算得到的应力-位移曲线也更能代表错位裂隙的真实变形特性。

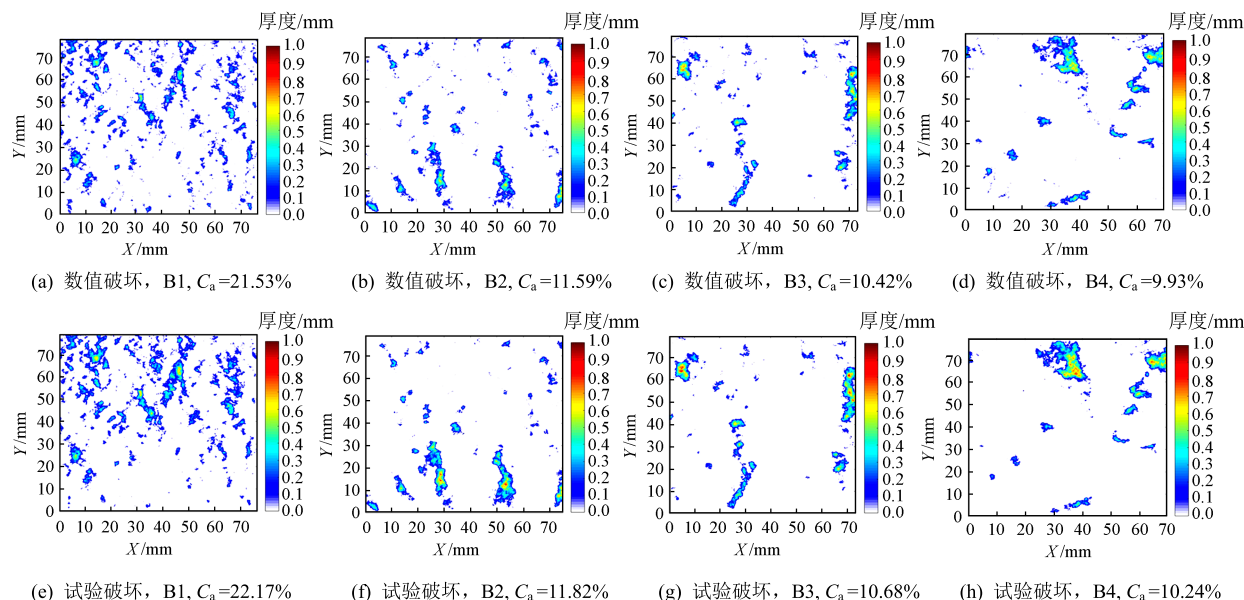


图5 数值计算与试验测量得到的表面破坏区域和厚度(参考图例)对比
Fig.5 Comparison of surface damage areas and thicknesses (see the legend) obtained from numerical simulation and experiment

5 错位砂岩裂隙法向变形特性分析

5.1 不同错位条件下裂隙的法向变形特性

为了系统性地对错位砂岩单裂隙的法向变形特性进行分析, 各选取一个边长为 8 cm 的细粒砂岩

和中粒砂岩裂隙面进行数值计算。裂隙面几何形貌如图6所示。在每组计算中, 固定裂隙下表面, 依次将上表面水平错动 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、10.0 mm, 从而形成一系列具有不同咬合度的裂隙。按照上述试验验证中的设定将每个错位量对应的模型法向加

载到 50 MPa, 记录完整的应力-位移曲线, 如图 7 所示。

与试验结果类似, 当法向应力较小时, 裂隙的接触面积较小, 法向刚度也较小, 法向变形的速率较快; 随着应力上升, 接触面积不断增大, 带动了法向刚度的增加, 减缓了法向变形的速率。随着错位量的增大, 裂隙表面的咬合度降低, 导致初始的接触面积和刚度减小, 裂隙变形量也随之增大。还可看出, 随着咬合度的降低, $V_{\max}$ 值逐渐增大, 代表裂隙内可供压缩的空腔体积变大; 同时, 曲线的曲率减缓, 说明裂隙的刚度降低。

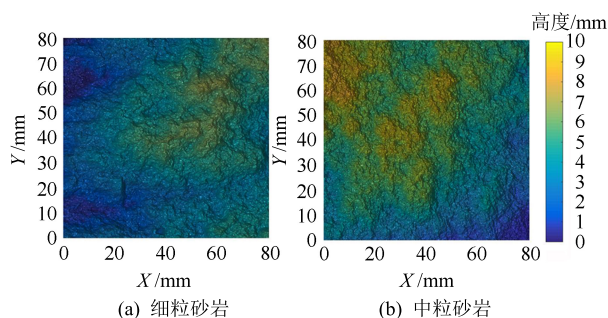


图 6 细粒砂岩和中粒砂岩裂隙下表面几何形貌
Fig.6 Morphology of the lower surfaces of fine-grained and medium-grained sandstone fractures

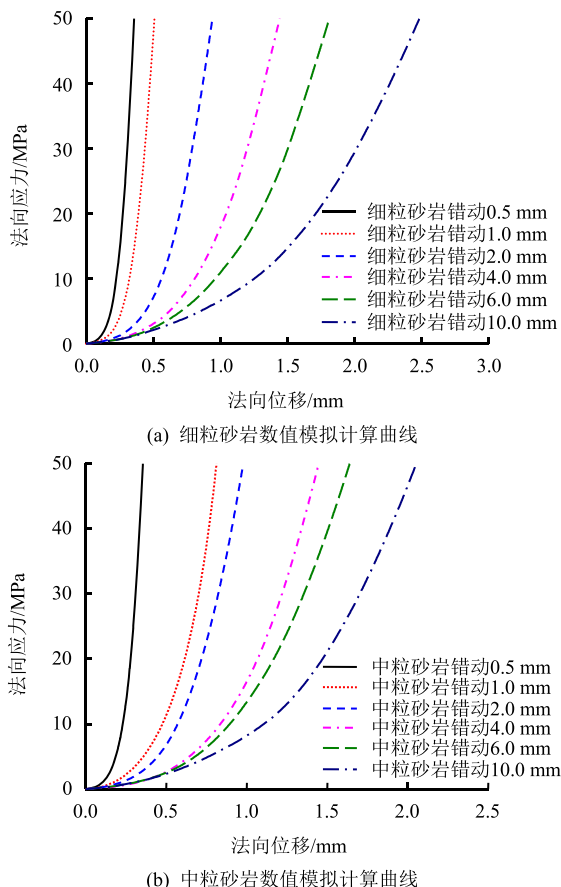


图 7 细粒砂岩、中粒砂岩数值计算结果
Fig.7 Numerical simulation results of fine-grained and medium-grained sandstone fractures

5.2 预测模型参数分析

用第 2 章节所述 3 个模型拟合应力-位移曲线, 结果如图 8 所示。3 个模型整体上都能较好地拟合曲线, R^2 的值在 0.97 以上。在应力水平较低时, BB 模型及对数模型产生较大的偏差, 在加载后期则拟合效果较好。统一指数模型由于引入了系数 n , 可以很好地弥补 BB 模型中裂隙法向刚度值固定不变这一不足, 因而拟合效果在 3 个模型中最优。

拟合得到的参数如表 3、4 所示。可见 $V_{\max}$ 和 n 的值随着错位距离的增大而变大, 而 K_{ni} 的值则逐渐减小, 表明随着裂隙咬合度的降低, 裂隙的开度逐渐增加, 而刚度则逐渐降低, 裂隙面逐渐由一些尖锐的微凸体支撑。 $V_{\max}$ 代表的是裂隙内可供变形的最大闭合量, 与裂隙开度紧密相关, 是 BB 模型和统一指数模型通用的参数。对对数模型来说, 随着错位量 l_0 的增加, p 呈增大而 q 呈减小的趋势, 但在细粒砂岩中规律出现反复, 并不单调变化, 表明该模型的预测并不稳定。

统计裂隙稳定接触时的局部最大开度 $e_{\max}$ 与 $V_{\max}$ 之间的关系, 如图 9 所示。可见, 两种砂岩裂隙中的 $V_{\max}$ 值略大于最大开度值的一半, 具有明显的线性关系。由于表面微凸体几何特征的随机性, 当发生错位之后, 两个面上同时凹进去的位置可能产生远大于平均值的局部开度, 在加载过程中由于其他接触的支撑, 这些局部张开的空腔在极大应力下也难以完全闭合, 造成 $e_{\max} > V_{\max}$ 的结果。两者的关系可写成:

$$V_{\max} = k \cdot e_{\max} \quad (12)$$

式中: 系数 k 的取值与裂隙表面的几何特征有关。细粒砂岩的 k 值为 0.63, 中粒砂岩的 k 值为 0.54。中粒砂岩和细粒砂岩裂隙表面的三维粗糙度值 (即 Z_2^{3D}) 分别为 0.60 和 0.41。分析规律可知, 随着裂隙面三维粗糙度的减小, $V_{\max}$ 与 $e_{\max}$ 更为接近; 可以预测到当裂隙面为两个平行平板时, 两者相等, 即 $k=1$ 。结合上述条件, 得到如图 10 的规律, 其中 k 与 Z_2^{3D} 的关系可写为

$$k = 1 - 0.92Z_2^{3D} \quad (13)$$

由于统一指数模型可以提供最优的拟合效果, 接下来进一步分析模型中 K_{ni} 和 n 与裂隙力学及几何参数之间的关系。图 11 展示的是 n 与几何参数之间的关系。这里用错位量 l_0 与裂隙边长 L 的比值 l_0/L 代表错位率。随着 l_0/L 的增加, 裂隙的咬合度不断降低, 造成 K_{ni} 和 $V_{\max}$ 的变化。整理各个参数之间的关系发现, n 与裂隙表面粗糙度和错位比 l_0/L 正相关, 可写为

$$n = 0.6 \times (Z_2^{3D})^{0.1} \cdot \left(\frac{l_0}{L} \right)^{0.5} + 0.43 \quad (14)$$

从式中各项的幂可以看出, n 与 l_0/L 的关系相较于与 Z_2^{3D} 的关系更为紧密, 说明 n 值主要受错位

率控制。对于 K_{ni} 来说, 除了裂隙的几何参数之外, 还受到岩石弹性模量 E 的直接影响, 两者正相关。为在关系式中统一 K_{ni} 与 E 的单位, 将 E 除以一个单位长度 1 m , 得到 E' 。整理数据得到的最优拟合直线如图 12 所示, 其关系可写为

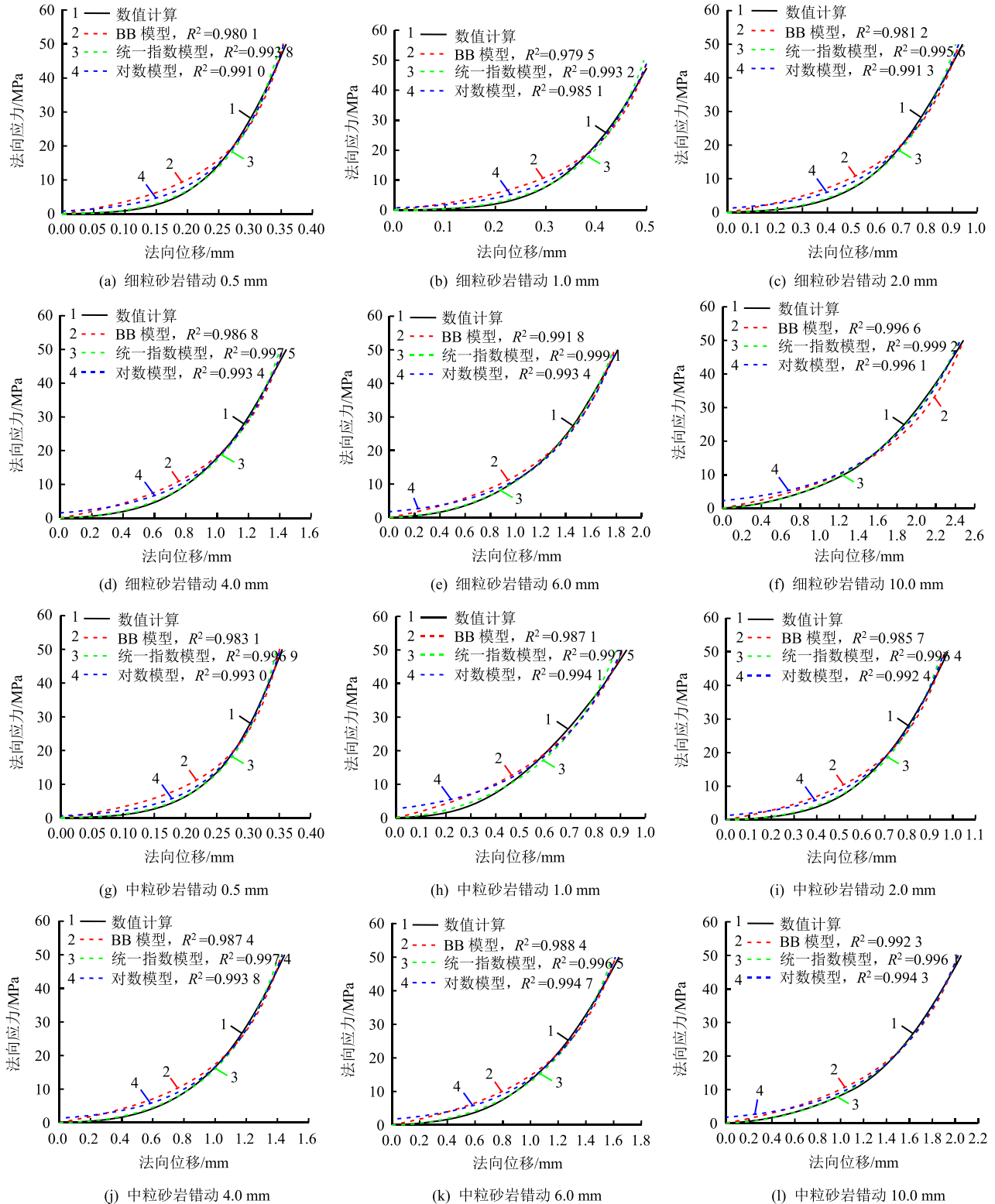


图 8 砂岩裂隙数值计算得到的应力-位移曲线以及 3 种模型拟合得到的曲线对比

Fig.8 Stress-displacement curves of sandstone fractures obtained from numerical calculation and comparisons between the fitting curves of three models

表3 细粒砂岩 BB 模型、统一指数模型和对数模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of BB, exponential and logarithmic models of fine-grained sandstone fractures

l_0 /mm	$V_{\max}$ /mm	K_{ni}		n	p	q
		BB 模型	指数模型			
0.5	0.44	27.46	20.49	0.46	-0.21	5.43
1	0.62	19.11	16.08	0.47	0.43	1.40
2	1.19	11.99	9.94	0.51	0.11	1.65
4	1.88	8.60	7.72	0.55	0.11	1.11
6	2.41	7.25	6.88	0.60	0.23	0.91
10	3.40	5.40	5.75	0.64	0.24	0.72

表4 中粒砂岩 BB 模型、统一指数模型和对数模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters of BB, exponential and logarithmic models of medium-grained sandstone fractures

l_0 /mm	$V_{\max}$ /mm	K_{ni}		n	p	q
		BB 模型	指数模型			
0.5	0.43	25.10	16.36	0.48	-0.09	5.05
1	0.65	17.88	13.54	0.51	-0.10	3.58
2	1.25	11.78	10.15	0.53	0.07	1.76
4	1.85	7.97	6.96	0.54	0.18	1.07
6	2.08	7.97	6.82	0.59	0.24	0.81
10	2.73	6.83	6.12	0.61	0.35	0.55

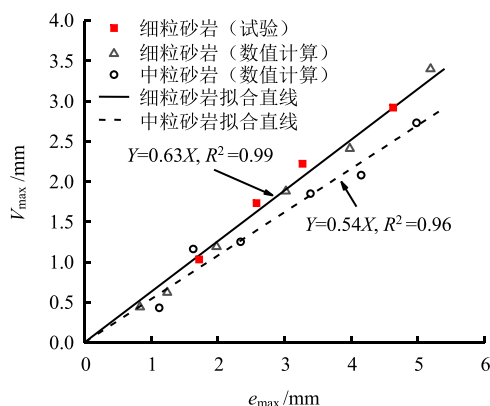


图9 $V_{\max}$ 与 $e_{\max}$ 的关系

Fig.9 Relation between $V_{\max}$ and $e_{\max}$

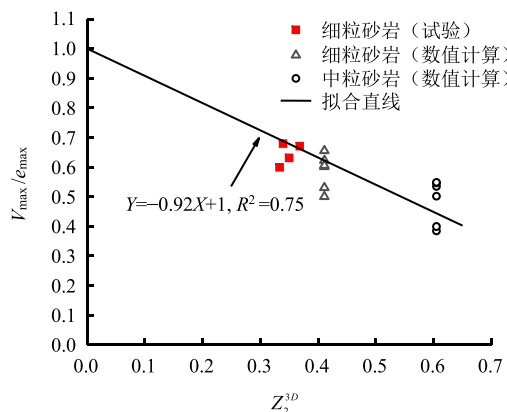


图10 $V_{\max}/e_{\max}$ 与 Z_2^{3D} 的关系

Fig.10 Relation between $V_{\max}/e_{\max}$ and Z_2^{3D}

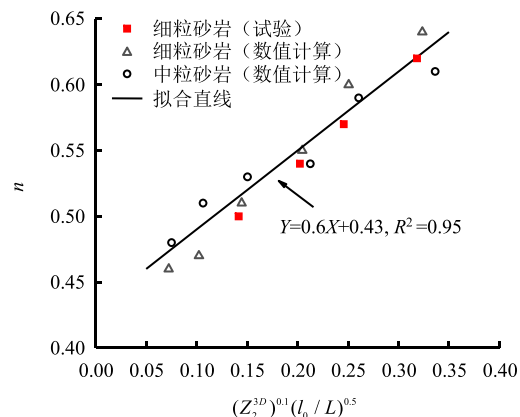


图11 n 与几何参数之间的关系

Fig.11 Relation between n and geometrical parameters

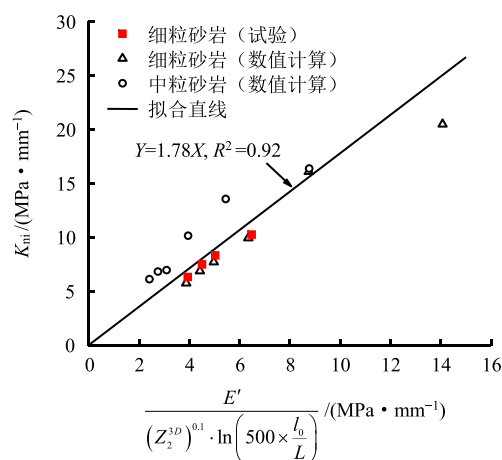


图12 K_{ni} 与力学及几何参数之间的关系

Fig.12 Relation between K_{ni} and mechanical and geometrical parameters

$$K_{ni} = \frac{1.78 \times E'}{(Z_2^{3D})^{0.1} \cdot \ln\left(500 \times \frac{l_0}{L}\right)} \quad (15)$$

与式 (13) 相似, 式中 Z_2^{3D} 代表的粗糙度影响较小, 弹性模量和错位率起主导作用。上述两式的预测值与数值计算值的 R^2 在 0.90 以上, 表明两式可以较准确地评价裂隙的力学及几何参数对模型中参数的影响。进一步将 4 个细粒砂岩试样加载试验的数据画入图 9~12 中, 可见试验数据与公式预测的直线吻合较好, 进一步验证了上述关系的正确性。

需要注意的是, 当错位超过一定量 (比如裂隙表面一个代表性的起伏长度) 之后, 继续错位时 K_{ni} 和 $V_{\max}$ 等参数将在一个小范围内波动, 不再持续单调变化。因此, 在实际使用中, 需根据裂隙尺度和表面特征确定一个极限错位率, 在错位率小于该值时上述公式成立; 大于该值时则直接采用该极限值。确定极限错位率是今后研究的一个重点。

6 结 论

(1) 通过应力-位移曲线以及破坏区域的对比验证了弹塑性接触模型的精度, 发现错位裂隙表面的接触体上应力相对集中, 在较低的应力水平下即可发生显著的破坏, 基于弹性模型的评价将产生较大偏差, 有必要基于弹塑性接触理论来准确评价裂隙的法向变形特性。

(2) 随着错位量的增加, 裂隙两个面之间的咬合度逐渐降低, 造成接触面积的减少和应力的集中, 因此咬合度越低的裂隙具有较大的 $V_{\max}$ 和较低的 K_{ni} 。

(3) BB 模型、统一指数模型和对数模型在整体上可以较好地预测错位裂隙的应力-位移曲线发展规律。BB 模型和对数模型的预测结果在应力较低时偏差较大, 而统一指数模型由于引入了参数 n , 预测效果较佳。

(4) $V_{\max}$ 与裂隙最大开度正相关; K_{ni} 与岩石弹性模量正相关, 与裂隙表面粗糙度和错位率负相关; n 随着 K_{ni} 的增大而减小, 与表面粗糙度和错位率正相关。在获取岩石裂隙基本参数的条件下可通过预测公式准确地评价裂隙的法向变形行为控制参数。

本研究仅对细粒砂岩和中粒砂岩两种岩石开展了研究, 所得到的预测公式虽符合试验规律但其适用范围还需进一步验证。今后将针对更多种类的岩石开展研究, 更加全面充分地揭示错位岩石裂隙的法向变形特性。

参 考 文 献

- [1] 侯会明, 胡大伟, 周辉, 等. 考虑细观等效热学参数的高放废物处置库围岩应力-渗流-温度耦合模拟方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3625-3634.
HOU Hui-ming, HU Da-wei, ZHOU Hui, et al. Thermo-hydro-mechanical coupling simulation method of surrounding rock in high-level radioactive waste repository considering effective meso-thermal parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3625-3634.
- [2] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 305-320.
LIU Quan-sheng, LIU Xue-wei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 305-320.
- [3] 李博, 黄嘉伦, 钟振, 等. 三维交叉裂隙渗流传质特性数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3670-3678.
LI Bo, HUANG Jia-lun, ZHONG Zhen, et al. Numerical simulation on hydraulic and solute transport properties of 3D crossed fractures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3670-3678.
- [4] STEPHANSSON O, HUDSON J, JING L. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in Geo-Systems[M]. [S. l.]: Elsevier, 2004.
- [5] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. New York: West Publishing Company, 1976.
- [6] BANDIS S C, LUMUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249-268.
- [7] PRATT H R, BLACK A D, BRACE W F. Friction and deformation of jointed quartz diorite[C]//Proceedings of the 3rd Congress of ISRM. Denver:[s. n.], 1974: 306-310.
- [8] IWAI K. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture[D]. Berkeley: University of California, 1976.
- [9] BARTON N R, BANDIS S C, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(3): 121-140.
- [10] MALAMA B, KULATILAKE P H S W. Models for normal fracture deformation under compressive loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(6): 893-901.
- [11] 俞锴, 赵晓豹, 赵维炳, 等. 改进的岩石节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 9: 1316-1321.
YU Jin, ZHAO Xiao-bao, ZHAO Wei-bing, et al. Improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 9: 1316-1321.
- [12] 荣冠, 黄凯, 周创兵, 等. 岩石节理法向加载非线性变形本构模型研究[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(4): 402-414.
RONG Guan, HUANG Kai, ZHOU Chuang-bing. A new constitutive law for the nonlinear normal deformation of rock joints under normal load[J]. **Scientia Sinica Technologica**, 2012, 42(4): 402-414.

- [13] BHUSHAN B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact[J]. **Tribology Letters**, 1998, 4(1): 1-35.
- [14] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. **Proceedings of the Royal Society**, 1966, 295: 300-319.
- [15] BROWN S R, SCHOLZ C H. Closure of random elastic surfaces in contact[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1985, 90: 5531-5545.
- [16] MATSUKI K, WANG E Q, SAKAGUCHI K, et al. Time-dependent closure of a fracture with rough surfaces under constant normal stress[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38(5): 607-619.
- [17] HOPKINS D L. The effect of surface roughness on joint stiffness, aperture, and acoustic wave propagation[D]. Berkeley: University of California, 1991.
- [18] LI B, ZHAO Z, JIANG Y, et al. Contact mechanism of a rock fracture subjected to normal loading and its impact on fast closure behavior during initial stage of fluid flow experiment[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2015, 39(11): 1431-1449.
- [19] ZOU L, JING L, CVETKOVIC V. Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 75(1): 102-118.
- [20] KLING T, VOGLER D, PASTEWKA L, et al. Numerical simulations and validation of contact mechanics in a granodiorite fracture[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(10): 2805-2824.
- [21] LEE S D, HARRISON J P. Empirical parameters for non-linear fracture stiffness from numerical experiments of fracture closure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(6): 721-727.
- [22] 靳瑾, 曹平, 蒲成志. 预制裂隙几何参数对类岩材料破坏模式及强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 529-535.
- JIN Jin, CAO Ping, PU Cheng-zhi. Influence of flaw parameters on damage mode and strength of rock-like materials[J]. **Journal of Central South University Science and Technology**, 2014, 45(2): 529-535.
- [23] ZOU L, LI B, MO Y, et al. A high-resolution contact analysis of rough-walled crystalline rock fractures subject to normal stress[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(10): 2141-2155.
- [24] TIAN X, BHUSHAN, B. A numerical three-dimensional model for the contact of rough surfaces by variational principle[J]. **Journal of Tribology**, 1996, 118(1): 33-42.
- [25] BROWN S R, SCHOLZ C H. Closure of random elastic surfaces in contact[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1985, 90: 5531-5554.

上接第1849页

- [23] 胡卫东, 祝新念, 周喜宇. 有限宽度无黏性砂土悬臂排桩柔性挡墙被动土压力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3748-3757.
- HU Wei-dong, ZHU Xin-nian, ZHOU Xi-yu. Experimental study on passive earth pressures of cohesionless soils with limited width against cantilever piles flexible retaining walls[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 2): 3748-3757.
- [24] KHOSRAVI M H, PIPATPOMGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid walls under translation mode[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(12): 1020-1028.
- [25] 史旦达, 毛逸瑶, 杨勇, 等. 基于 DIC 技术的砂土中圆形锚板上拔土体变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3201-3213.
- SHI Dan-da, MAO Yi-yao, YANG Yong, et al. Experimental study on the deformation characteristics of soils around uplift circular plate anchors using digital image correlation technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(10): 3201-3213.
- [26] 林奎, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1311-1318.
- LIN Luan, TANG Chao-sheng, CHENG Qing, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(7): 1311-1318.
- [27] MARX D, JACOBSSZ S W, EEDEN S. Pile displacement measurement using digital image correlation[J]. **Civil Engineering : Magazine of the South African Institution of Civil Engineering**, 2018, 26(3): 54-56.
- [28] TAKANO D, LENOIR N, OTANI J, et al. Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation[J]. **Soils and Foundations**, 2015, 55(4): 906-915.