

基于动力显式方法的岩体结构面剪切破坏特征研究

赵宇飞, 汪小刚, 贾志欣, 林兴超

(中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 岩体中大量存在的各种不连续面, 如断层、节理、裂隙等, 是影响岩体工程力学特性的最重要的因素, 因此, 对岩体中广泛存在的结构面工程特性的研究具有重要的工程意义。在动力显式方法的基础上, 对规则锯齿状的结构面进行剪切破坏特征进行分析, 并进行室内模型试验。对数值模拟与模型试验的结果进行对比分析, 得出归一化的锯齿状结构面在不同法向应力作用下的剪切破坏力学行为及重要剪切破坏规律, 并验证了利用动力显式方法进行节理岩体工程力学特性研究的适应性。研究表明: 在一定法向应力水平下, 规则锯齿状结构面剪切破坏是随着剪切位移的增长而不断扩展, 主要表现为结构面上的等效塑性应变分布范围与深度的不断扩大, 最后达到纯摩擦的残余强度状态; 等效塑性应变的扩展规律一般是在剪切方向上从试样两侧逐渐向中间扩展, 对于下侧结构面而言, 在达到剪切应力峰值之前, 剪切应力主要分布在试样中相背剪切速度方向的一侧, 在剪切峰值之后, 随着结构面破坏范围不断增大, 剪切应力分布趋于均匀; 当正应力不断增大时, 结构面发生爬坡滑移越来越困难, 结构面破坏深度不断增大, 峰值剪应力所对应的破坏模式逐渐变为直接剪断锯齿破坏。

关键词: 岩石力学; 岩体结构面; 剪切破坏; 动力显式法; 模型试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2013)06 - 1229 - 10

STUDY OF SHEAR FAILURE CHARACTERISTICS OF ROCK STRUCTURAL SURFACE BASED ON DYNAMIC EXPLICIT METHOD

ZHAO Yufei, WANG Xiaogang, JIA Zhixin, LIN Xingchao

(Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The most important influencing factor of rock mass strength characteristics is the discontinuities randomly distributed in rock mass. Thus, study of the mechanical properties of rock discontinuities is of great engineering significance. Based on the dynamic explicit method, the shearing failure characteristics of regular sawtooth-like structural surface is numerically simulated; and relevant model test is carried out. Comparing the numerical result with test result, the shearing failure behavior and failure patterns of normalized sawtooth-like structural surface under different normal stresses are obtained. Consequently, the applicability and reliability of the employed numerical simulation method are verified. The results indicate that: (1) Under certain normal stress, shearing failure of regular sawtooth-like structural surface develops continuously with the increase of shearing displacement, suggesting that the distribution and depth of equivalent plastic strain extended. Finally, the shearing failure reaches pure friction residual strength state. (2) The growth of rock equivalent plastic strain usually propagates from two ends to the middle gradually. For the low structural plane, shear stress is mainly distributed in the side opposite to shear velocity before reaching the peak value. After the peak value, the distribution of shear stress is uniform with increase of failure extent of structural plane. (3) When the normal stress increases, the displacement of structural plane climbing becomes more difficult and thus the failure depth increases. Thus, the failure pattern corresponding to the peak stress is becoming direct shearing sawtooth failure.

Key words: rock mechanics; rock discontinuities; shear failure; dynamic explicit method; model test

收稿日期: 2013 - 01 - 11; **修回日期:** 2013 - 02 - 22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013502); 国家自然科学基金面上项目(51179210); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题资助项目(2013ZY05)

作者简介: 赵宇飞(1979 -), 男, 2005年于中国水利水电科学研究院岩土工程专业获硕士学位, 现任工程师, 主要从事岩石力学试验与数值分析方面的研究工作。E-mail: zhaoyf@iwhr.com

1 引言

岩体中广泛发育的结构面是在地质营力的作用下岩体发生强烈的变形、破坏后遗留下来的产物，在三维空间上的展布极其复杂。结构面使岩体各类力学性质表现出很强的各向异性等特征，成为控制重要建筑物稳定的重要因素。在工程实际中，针对结构面发育的节理岩体的加固一般都采用预应力锚固技术，但预应力锚固技术对节理岩体的加固机制表现在不同的作用方面，如加筋作用、应力调整作用、增韧止裂作用等，加固效果所表现出来的的是一个多种作用的综合作用结果。要研究预应力锚固对节理岩体的加固机制，首要的问题就是对节理岩体的剪切破坏特性进行深入研究，并在研究中找到适合对锚固机制综合分析的适用方法。因此，深入开展岩石节理力学性质和破坏机制的研究，不仅对合理评价岩体质量、正确分析岩体稳定等方面有重要意义，也是研究节理岩体锚固机制的重要基础，具有重要的理论研究意义与工程应用价值^[1]。

针对不同正应力作用下的结构面力学行为特征，从上世纪开始，国内外许多学者对这一问题开展了大量的研究工作^[2-5]，J. C. Jaeger 等^[6-8]利用天然岩石结构面开展了一系列结构面剪切试验研究，结果表明，随着剪切变形的发展与积累，岩石结构面表面粗糙度降低，结构面强度逐渐降低。

另外，随着计算机技术的不断发展，其在时间、费用、复杂程度和可重复性上具有较大的优势，数值模拟逐渐成为研究岩体结构面力学特性的重要分析方法，岩土工程方面，R. E. Goodman 等^[9]最早将有限元方法应用于岩体中的节理力学研究，近年来，易成和王长军^[10]运用有限元方法对岩体中结构面力学行为也进行了分析。随着计算力学的发展，许多研究人员都对岩体结构面的力学行为进行了相应的研究与应用，目前，在岩土工程中应用较多的还有边界元法^[11-13]、离散元法^[14]、流形元法^[15-17]、无单元法^[18-20]等数值分析方法。这些数值分析方法有的没有考虑结构面之间的黏结与粗糙起伏、有的没有考虑结构面剪切过程中的张开滑移，研究所得到的成果具有一定的局限性。

通过对原生结构面、构造结构面以及次生结构面形态的分析可知，结构面形态主要有平直结构面、波状起伏结构面、锯齿状起伏结构面以及台阶状起伏结构面 4 类。在这些形状的结构面中，其中，锯

齿状起伏结构面可以用起伏高度和斜率来定量表示，波状起伏型结构面与锯齿状结构面的工程力学特性相近。在实际工程中，所见的结构面大多属于波状起伏结构面。因此，采用了归一化的锯齿状结构面对常见的波状起伏结构面进行力学行为研究，可为实际工程中岩体结构面破坏模式、破坏特征、力学参数确定等问题提供重要的技术支持。

本文利用动力显式计算方法，考虑了岩石与结构面两者之间的接触，以及结构面剪切过程中的张开与大变形等因素，对锯齿状的结构面在剪切过程中的破坏模式、破坏特征以及结构面抗剪强度参数确定等方面进行了探讨与分析，并结合液压伺服万能试验机上进行的相同类型结构面的直剪模型试验成果，开展了模型试验与数值试验的对比分析。通过研究可知，归一化的锯齿状结构面在不同法向应力作用下的剪切破坏力学行为以及重要剪切破坏规律，同时验证了利用动力显式方法进行节理岩体工程力学特性研究的适应性。

2 规则锯齿状结构面力学破坏特性

通过规则锯齿状结构面的直剪试验可知，结构面的粗糙度、爬坡齿角、张开宽度以及充填物等，都会对岩石结构面的力学效应与强度参数等方面有重要的影响。本文中，仅对无填充的紧密闭合结构面进行了剪切过程中的力学行为模拟分析。通过室内外试验与理论分析可知，锯齿状无填充闭合的结构面破坏类型主要有 3 种：爬坡滑移、爬坡滑移破坏及不爬坡破坏^[1]。

对于不同的法向应力水平，规则的锯齿状结构面表现出不同的破坏模式，规则锯齿状结构面的受力分析如图 1^[1]所示。当结构面锯齿爬坡角度较大时，在相同的正应力水平下，结构面中的锯齿较易破坏，获得的岩体结构面抗剪强度参数较高。

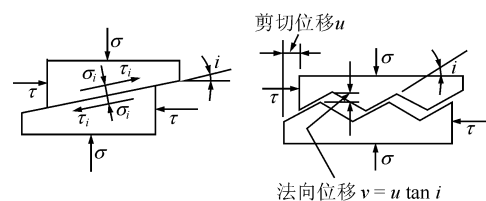


图 1 规则锯齿状结构面受力分析示意图^[1]

Fig.1 Sketches of force analysis of regular sawtooth-like structural surface^[1]

另外，随着试验正应力水平的不断增大，规则锯齿状结构面爬坡剪胀效应越来越小，当正应力水

平达到一定值时，结构面不再发生爬坡，直接从锯齿根部剪断岩块破坏。通过推导可知，断面为等边三角形的规则锯齿状结构面不发生爬坡破坏的正应力表示如下：

$$\sigma_m = \frac{c_r - \frac{c_j}{2(\cos i - \sin i \tan \varphi_j) \cos i}}{\tan(\varphi_j + i) - \tan \varphi_r} \quad (1)$$

式中： σ_m 为结构面不发生爬坡破坏的临界正应力 (MPa)， φ_r 为岩块内摩擦因数， c_r 为岩块黏聚力 (MPa)， φ_j 为结构面上的摩擦因数， c_j 为结构面的黏聚力 (MPa)， i 为锯齿结构面中的爬坡角。因此，对于不同的正应力水平，锯齿状结构面在一定爬坡阶段表现出不同的剪切破坏强度公式：

$$\tau = \begin{cases} \sigma \tan(\varphi_r + i) + \frac{c_j}{2(\cos i - \sin i \tan \varphi_j)} & (\sigma < \sigma_m) \\ \sigma \tan \varphi_r + c_r & (\sigma \geq \sigma_m) \end{cases} \quad (2)$$

在退坡阶段，规则锯齿状结构面剪切破坏强度为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_r - i) \quad (3)$$

锯齿状岩石结构面的直剪试验曲线如图 2 所示，从图 2 中可以看出，结构面所受剪应力与结构面剪切应变在结构面爬坡阶段大致呈线性，但是在达到峰值之后，随着剪切位移的增大，剪应力减小，在第二个爬坡阶段，结构面剪应力又随剪切应变的增大而增大。

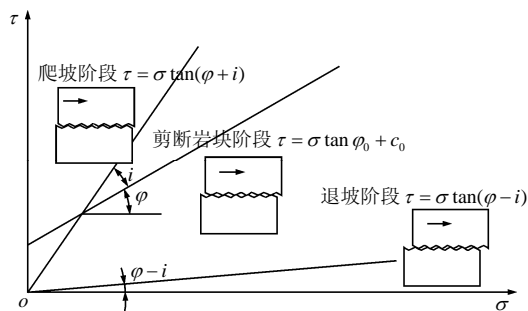


图 2 规则锯齿状结构面剪切强度曲线

Fig.2 Curves of shear strength of regular sawtooth-like structural surface

3 数值模拟计算理论

3.1 动力显式算法简介

由于本文中所采用的岩体结构面为概化的规则锯齿状结构面，在剪切过程中将会由于爬坡作用结构面张开，产生较大的张拉变形。因此，一般的数

值模拟方法难以进行规则锯齿状结构面剪切破坏全过程的模拟分析。本文采用了 ABAQUS 程序中提供的动力显式方法对规则锯齿状的岩体结构面进行了剪切破坏全过程的数值模拟分析。显式算法对复杂的接触问题有较好的适应性^[20]。

ABAQUS 中提供的动力显式算法采用的是中心插值方法，即在时间 t 时，满足动力平衡条件，节点上的质量矩阵 M 乘以加速度矩阵 \ddot{u} 等于节点上的力(外力 P 减去内力 I)，如图 3 所示，图中，实心圆代表 t 时刻的某节点位置；空心圆表示其受到外力 P 及内力 I 作用后，在 $t + \Delta t$ 时刻发生位移 u 后的位置。

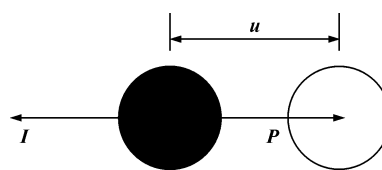


图 3 模型节点受力分析示意图

Fig.3 Sketch of force analysis of model points

图 3 所示关系用公式可表示为

$$M\ddot{u} = P - I \quad (4)$$

则此增量步起始时刻 t 的加速度可以按以下公式进行计算：

$$\ddot{u}|_{(t)} = M^{-1}(P - I)|_{(t)} \quad (5)$$

显式方法总是采用的集中质量矩阵(对角质量矩阵，对角线上非零，其余均为零元素)，求解加速度无需联合求解整体方程组。某节点上的加速度完全由节点质量和节点力确定。当节点加速度在时间增量步中保持不变，则可按中心插值方法计算得到速度增量，将其累加到前一个增量步中点的速度上，就可以计算得到本增量步中点时刻的速度：

$$\dot{u}|_{\left(t+\frac{1}{2}\Delta t\right)} = \dot{u}|_{\left(t-\frac{1}{2}\Delta t\right)} + \frac{\Delta t}{2} \left(\ddot{u}|_{\left(t+\frac{1}{2}\Delta t\right)} + \ddot{u}|_{(t)} \right) \quad (6)$$

对速度积分则可以得到增量步结束时的位移：

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t \dot{u}|_{\left(t+\frac{1}{2}\Delta t\right)} \quad (7)$$

因此，增量步起始时刻满足动力平衡条件，则由此确定初始加速度，随之得到速度与位移。计算过程中，需要将时间增量步设置的足够小，才能满足计算要求。

3.2 接触面设置原理

另外，在数值模拟中，还要解决的问题是锯齿状结构面两壁之间的相互关系，在数值模拟中，需要考虑结构面上、下两壁之间的相互作用，主要包括 2 个部分：一个是两者之间的法向作用，另一个是两者在切向上的相互作用^[21]。

(1) 接触面的法向模型

对大部分的接触问题来说，接触面的法向行为十分明确，即两接触面只有在压紧的状态时才能互相传递荷载，若两接触面之间有间隙时不会传递法向压力，这种法向行为一般称之为硬接触。在实际计算分析中，两接触面之间的压力与其间隙关系如图 4 所示。这种法向行为在计算中限制了可能发生的穿透现象，但当接触条件从有间隙到无间隙转变时，可能导致两接触面上的压力非常大，有时会使接触计算很难收敛。

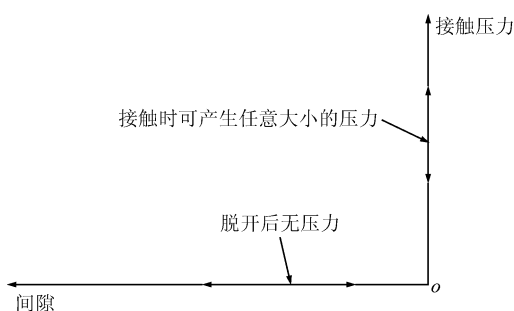


图 4 刚性接触中的压力与间隙的关系

Fig.4 Relationship between pressure and gap of rigid contact

(2) 接触面的切向模型

在数值模拟中，考虑接触面切向状态，将其分为 2 个阶段。当接触面接触紧密(有正应力作用)时，接触面可以传递切向应力(或者称之为摩擦力)。若摩擦力小于某一极限值时，则接触面处于黏结状态；若摩擦力大于极值力之后，接触面开始出现相对滑动变形，称为滑移状态。

在接触面的滑移模型中，需要设置极限剪切力，通常采用 Coulomb 定律计算极限剪应力，表示为

$$\tau_{crit} = \mu p \tag{8}$$

式中： μ 为接触面摩擦因数，可以随剪切速率、温度或其他场变量变化； τ_{crit} 为极限剪切力； p 为法向接触压力。

理想状态下，接触面在滑移状态之前，没有剪切变形，但这会影响到数值计算上的困难，因此在计算中引入弹性滑移变形，指表面黏结在一起时允许发生的少量相对滑移变形，弹性滑移变形示意图如图 5 所示。

3.3 材料破坏准则

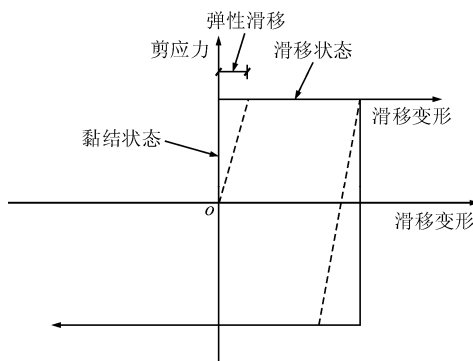


图 5 弹性滑移变形示意图

Fig.5 Concept of elastic slip deformation

岩石和混凝土材料的抗压强度远大于抗拉强度，材料受剪时颗粒会膨胀，考虑材料变形的非线性，为获得较精确的结果，选用 Mohr-Coulomb 模型进行弹塑性分析。它考虑了静水应力分量的影响，静水压力越高，则屈服强度越大。其塑性行为被假定为理想弹塑性材料^[22]。

以应力不变量形式表示的材料屈服准则为

$$f(I_1, J_2, \theta_\sigma) = 0 \tag{9}$$

其中，

$$f = \sqrt{J_2} - \frac{\sqrt{3} \sin \phi I_1}{3(\sqrt{3} \cos \theta_\sigma + \sin \theta_\sigma \sin \phi)} - \frac{\sqrt{3} c \cos \phi}{\sqrt{3} \cos \theta_\sigma + \sin \theta_\sigma \sin \phi} = 0 \tag{10}$$

式中： I_1 为第一应力不变量，即 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ； $J_2 = (1/6)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$ ； θ_σ 为罗德角，有 $-30^\circ \leq \theta_\sigma \leq 30^\circ$ ； ϕ 为材料内摩擦角， c 为材料黏聚力。

在应力空间中，Mohr-Coulomb 准则是一个不等边的六边形锥体，锥体顶点为 $(c \cot \phi, c \cot \phi, c \cot \phi)$ ，如图 6 所示。

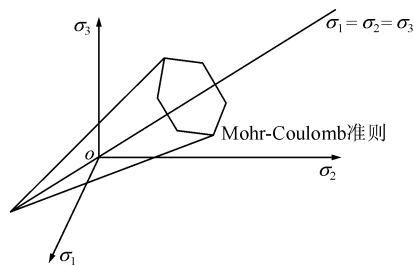


图 6 Mohr-Coulomb 准则应力空间示意图

Fig.6 Sketch of Mohr-Coulomb criterion in stress space

4 数值计算分析

4.1 数值计算模型的建立

结合室内模型试验情况，建立了结构面直剪试验模型，模型尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm。上半块模型尺寸为 30 cm×30 cm×10 cm，下半块模型尺寸为 30 cm×30 cm×20 cm。模型中，锯齿尺寸为高度为 5 mm，宽度为 15 mm，爬坡角为 33°。

建立的数值模型如图 7 所示，模型单元采用实体单元，共划分 40 680 个单元。划分网格时，将上、下两块接触的锯齿附近进行了加密，划分后的单元较小，主要是为了保证计算精度，另一方面也为了更好地模拟锯齿状岩体结构面的破坏过程。

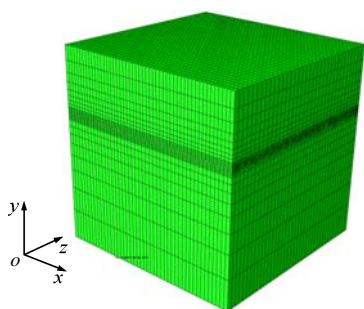


图 7 数值计算模型

Fig. 7 Numerical calculation model

数值分析中，对上、下两块岩体进行接触面设置，由于在数值模拟中，剪切位移加在锯齿结构面上部的岩体上，因此设置位于上部的锯齿面为主动面，位于下部的锯齿面为从动面，以保证能够较好地模拟结构面的力学行为。另外，在进行结构面接触属性设置时，采用了罚函数模型，这种模型可以适用于大多数的接触问题。在数值模型中，各类计算参数采用了物理模型试验中的相关参数，如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数取值表

Table 1 Parameters for numerical simulation

	容重/ (kN · m ⁻³)	抗剪强度参数		变形参数	
		摩擦因数	黏聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
岩体	26	1.20	2.0	26.7	0.19
结构面	-	0.25	-	-	-

4.2 数值分析结果

(1) 采用动力显式计算方法，考虑了结构面在剪切过程中的爬坡张开、扭曲变形等现象，如图 8 所示。从图 8 中可以看出，在岩体结构面剪切过程中，相对于剪切之前(见图 8(a))，剪切过程中，锯齿状结构面发生了变形(见图 8(b))，锯齿不再规整。

另外，通过数值模拟结果可知，在剪切开始初期，岩体结构面主要表现为爬坡滑移的变形特征，



(a) 剪切试验开始前



(b) 剪切试验过程中

图 8 锯齿状结构面剪切前、后变形对比分析

Fig.8 Comparative analysis of deformation of sawtooth-like structural surface before and after shear test

随着剪切位移不断发展，结构面变形破坏主要转换为剪切破坏类型；在剪切峰值之后，结构面上等效塑性应变基本完全覆盖所有锯齿结构面，反映了峰值之后的结构面被磨平再造，直剪试验表现出了纯摩试验特征。

(2) 正应力施加过程中，随着正应力水平的不断增加，在靠近锯齿结构面剪切方向上的最外侧岩体中会有较大的塑性应变发生，如图 9 所示。

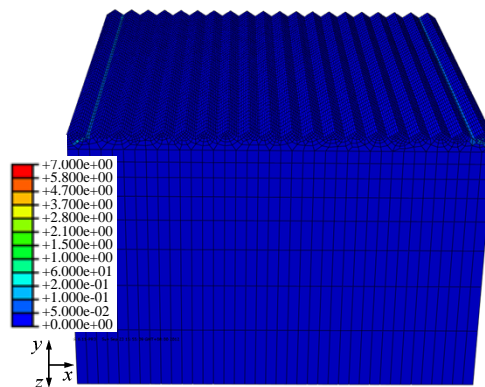
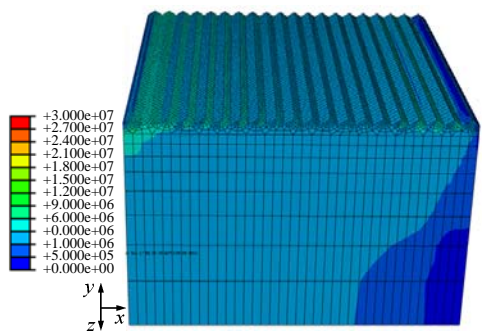


图 9 下侧结构面正应力施加完成后等效塑性应变分布

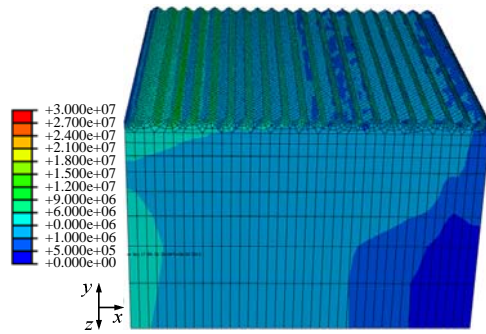
Fig.9 Distribution of equivalent plastic strain of underside structural surface after normal stress applied

图 9 中，施加的正应力为 2 MPa 时，在正应力施加完成后，最外侧锯齿内侧根部等效塑性应变较高，可能发生张拉破坏。因此，在试验中合理选择正应力比较关键，如果正应力较大时，在正应力施加过程中可能对结构面剪切试样造成损伤破坏。

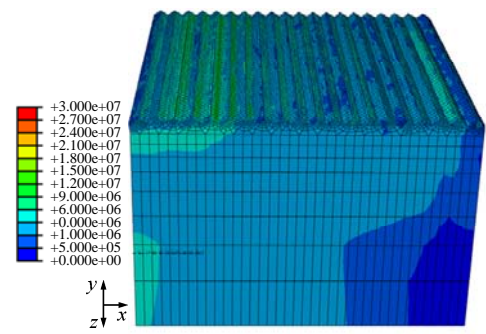
(3) 剪切过程中应力分布变化过程。从模拟分析结果可以看出，随着剪切位移的逐渐增大，试样中应力分布随着剪切位移不断增长而逐渐扩展。图 10 为法向应力为 1 MPa 时，剪切过程中不同剪切位移条件下，下侧结构面所对应的应力分布云图。在剪切峰值之前，应力分布主要集中在下结构面中剪切



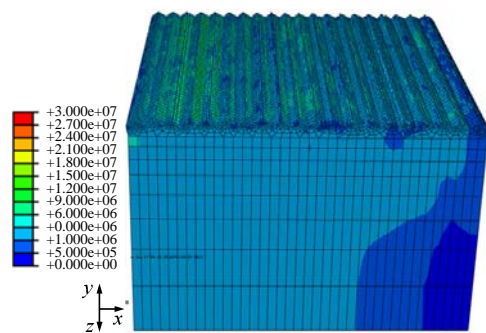
(a) 剪切位移为 0.4 mm



(b) 剪切位移为 1.0 mm



(c) 剪切位移为 2.0 mm



(d) 剪切位移为 2.6 mm

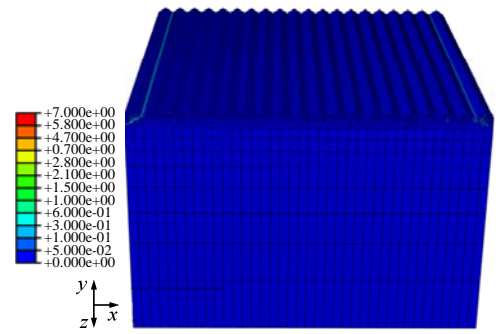
图 10 下侧结构面应力分布云图(单位: Pa)

Fig.10 Nephograms of stress of underside structural surface(unit : Pa)

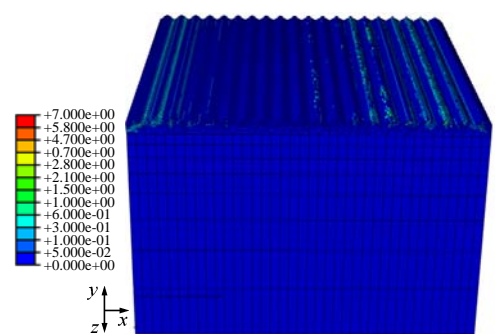
方向相反的一侧锯齿上,当到达剪切峰值之后,应力分布在整个剪切面上趋于平均分布。

(4) 在剪切试验中,通过积分点处的等效塑性应变的分布与发展可知规则结构面随着剪切位移增长而破坏的过程。

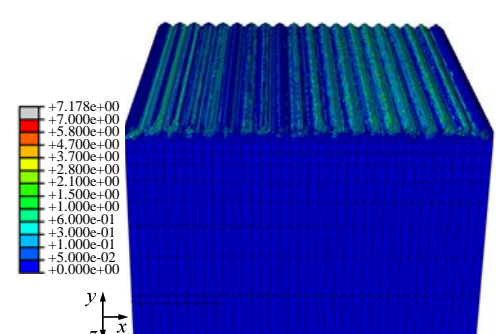
图 11 所示为正应力为 1 MPa 条件下,不同的剪切位移所对应的下侧剪切面上等效塑性应变云图。



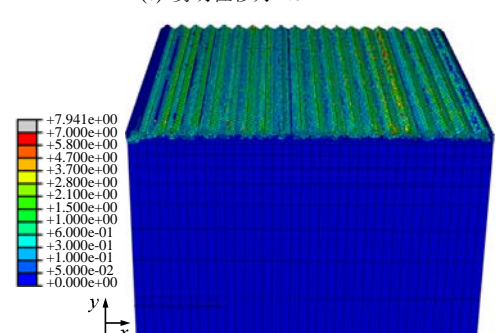
(a) 剪切位移为 0.4 mm



(b) 剪切位移为 1.0 mm



(c) 剪切位移为 2.0 mm



(d) 剪切位移为 2.6 mm

图 11 下侧结构面等效塑性应变分布云图

Fig.11 Nephograms of equivalent plastic strain of underside structural surface

从图中可知,在剪切初期,下侧结构面中等效塑性应变主要集中外侧锯齿根部,表明锯齿状结构面的破坏最先由该部位发生;随着剪切位移的增长,等效塑性应变从结构面两侧向中部发展;当剪切破坏后,等效塑性应变分布范围与深度达到最大,表明锯齿状结构面基本上全部发生了破坏。

(5) 在剪切试验中，随着正应力水平的不断增大，结构面滑移张开的空隙越来越小，即结构面剪胀效应越来越不明显。另外，通过节点上的等效塑性应变分布也可知，随着法向应力的不断增大，结构面剪切破坏范围与深度不断增大。正应力分别为 0.5 和 2.0 MPa 条件下，剪切破坏时的结构面上的等效塑性应变云图如图 12 所示。

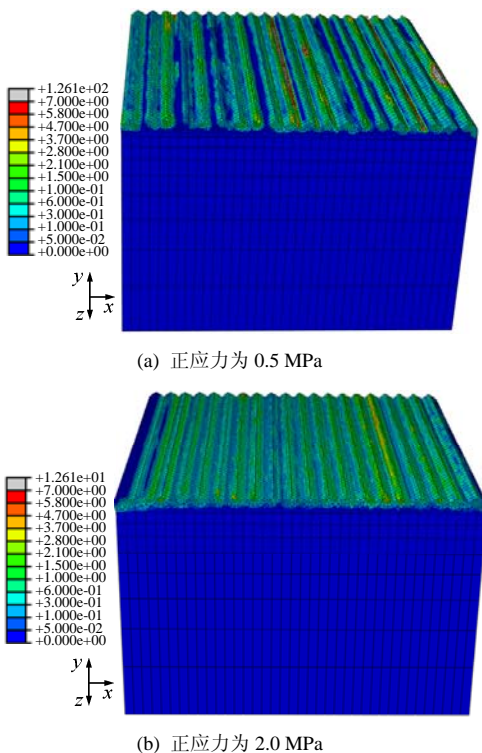


图 12 不同正应力水平下结构面破坏时等效塑性应变分布
Fig.12 Distributions of equivalent plastic strain under different normal stresses of underside structural surface at failure

(6) 在剪切试验中，得到了每个剪切试样在剪切过程中的剪切应力与剪切位移之间的关系曲线，如图 13 所示。通过每一级正应力水平下的剪应力峰值强度，利用最小二乘分析方法，计算得到结构面抗剪强度参数，其中，内摩擦角为 48.24°，黏聚力为 0.09 MPa，回归分析曲线如图 14 所示。

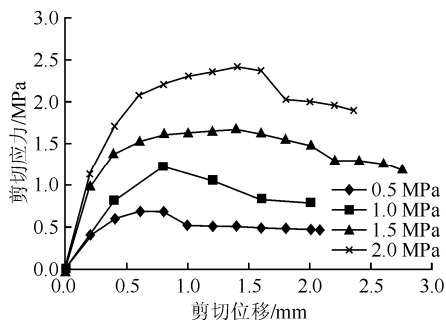


图 13 结构面剪切应力与剪切位移相关曲线
Fig.13 Relational curves between shear stress and shear displacement of underside structural surface

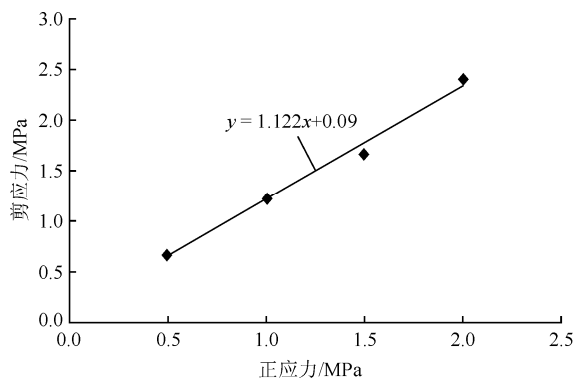


图 14 数值模拟中结构面剪切强度参数回归曲线
Fig.14 Regression analysis curve of shear strength parameters of structural surface from numerical simulation

5 室内模型试验分析

5.1 模型试验简介

在室内人工浇筑规则状锯齿结构面水泥砂浆试样，进行了不同正应力水平下的剪切试验，通过室内模型试验与数值分析结果的对比分析，验证数值算法的工程适用性，为今后的锚固岩体直剪试验模拟分析提供重要的基础资料。

模型试样尺寸为 0.3 m×0.3 m×0.3 m(长×宽×高)，其中，锯齿角度为 33°，其锯齿在断面上呈等腰三角形，如图 15 所示。

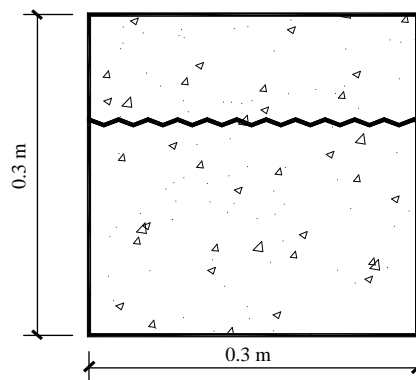


图 15 室内模型试验试样设计图
Fig.15 Design of sample for physical model test

选用强度等级为 C30 混凝土来模拟岩石材料，其配比为水泥：砂子：河石：水 = 349：644：1198：185。根据资料，C30 混凝土的单轴抗压强度为 20.1 MPa，弹性模量为 30 GPa，容重为 25 kN/m³。所浇筑的物理模型试验如图 15 所示。

试验中，正应力与剪应力施加方法参考了目前岩土工程中常用的结构面直剪试验方法^[23]进行，试

验中所采用的正应力分别为 0.2, 1.0, 1.5 及 2.0 MPa, 剪切速度为 1 mm/min。

5.2 模型试验结果分析

在剪切试验过程中, 通过观察可知规则锯齿状结构面在剪切过程中的破坏过程, 与数值模拟结果相似, 主要分为爬坡滑移、剪断破坏及磨平再造 3 个阶段。其中, 爬坡滑移阶段主要发生在剪切位移施加的初始阶段, 随着剪切应力的增大, 结构面力学行为逐渐转换为剪断破坏, 到达峰值之后, 结构面的力学行为主要表现为磨平再造, 结构面的规则锯齿状突起逐渐被磨平, 达到纯摩状态, 此时剪切应力表现为残余应力。结构面的剪切破坏过程如图 16 所示。

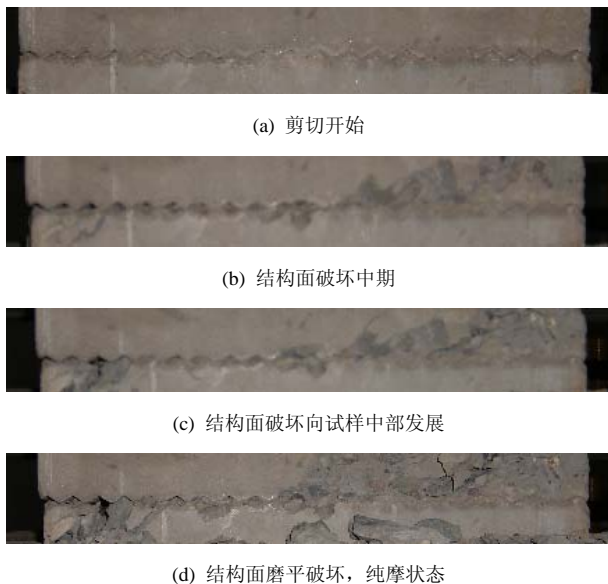


图 16 直剪试验中结构面破坏过程

Fig.16 Failure process of structural surface during shear test

不同的正应力水平下结构面剪应力与剪切位移之间的关系曲线如图 17 所示。

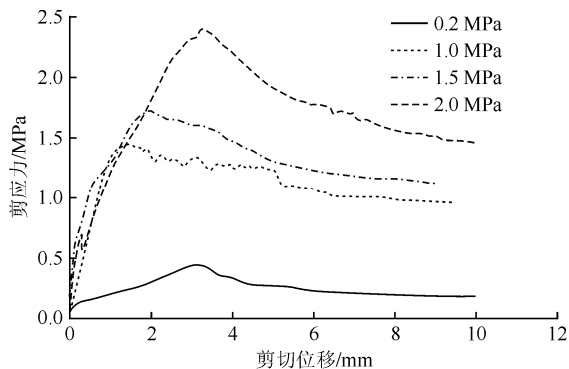


图 17 结构面剪应力与剪切位移曲线

Fig.17 Curves between shear stress and shear displacement of structural surface

通过试验中得到的数据进行回归拟合, 得到不同爬坡角的结构面抗剪强度参数值, 其中, 内摩擦角为 46.3°, 黏聚力为 0.27 MPa, 回归分析曲线如图 18 所示。

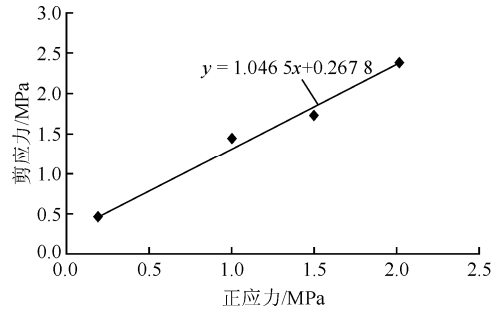
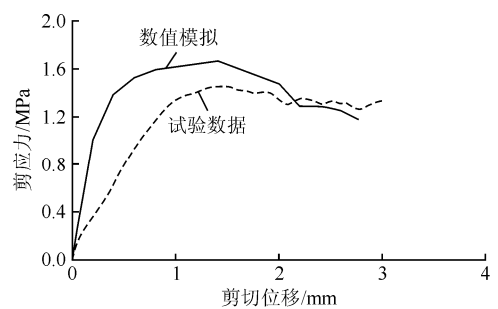


图 18 试验中结构面剪切强度参数回归曲线

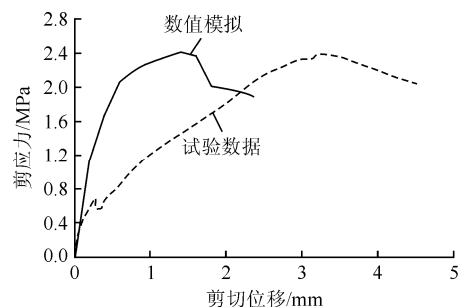
Fig.18 Regression analysis curve of shear strength parameters of structural surface from test

5.3 数值模拟试验与物理模型试验的对比分析

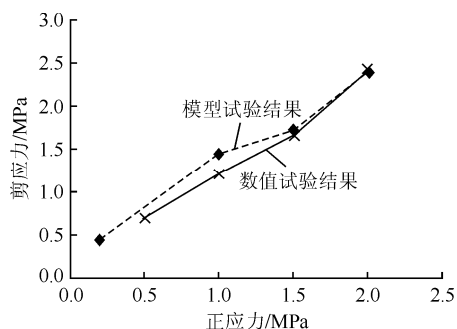
图 19 为数值模拟与模型试验结果比较, 从图 19 中可以看出, 数值模拟得到的规则锯齿状结构面的剪切应力与剪切位移关系曲线大致与室内模拟试验得到的曲线相一致, 峰值较为接近, 如图 19(a), (b) 所示。造成数值模拟与室内模型试验曲线不一致的可能原因是, 数值模拟分析中计算参数与模型试验不匹配、模型试验试样装配误差等因素。另外, 模型试验中的试样浇筑质量、试样养护条件、试验过程中的加载速率等也都也会造成模型试验与数值模拟结果之间的差异。



(a) 正应力为 1.0 MPa



(b) 正应力为 2.0 MPa



(c) 数值分析与模型试验中的正应力与剪应力散点图

图 19 数值模拟与模型试验结果比较

Fig.19 Comparisons between numerical simulation results and model test results

另外, 数值模拟与室内模型试验得到的结构面抗剪强度参数一致性较好, 如图 19(c)所示。由此可知, 利用动力显式法可以较为合理地再现岩体结构面剪切破坏力学过程, 并且得到的结构面抗剪强度参数与室内模型试验得到的结果较为一致, 可为深入研究节理岩体工程力学特性提供合理、可行的技术手段。

6 结 论

(1) 利用动力显式法对规则的锯齿结构面破坏特征进行分析, 表明, 在一定的正应力水平下, 规则锯齿状结构面剪切破坏是随着剪切位移的增长而不断地扩展, 主要表现为结构面上的等效塑性应变分布范围以及分布深度不断扩大, 最后达到纯摩擦的残余强度状态。等效塑性应变的扩展规律一般是在剪切方向上从试样两侧逐渐向中间扩展。另外, 在剪切破坏过程中, 结构面破坏大致分为爬坡滑移、剪切破坏及残余摩擦 3 个阶段, 通过室内试验也验证了这一点。

(2) 剪切过程中, 对于下侧结构面而言, 在达到剪切应力峰值之前, 剪切应力主要分布在试样中相背剪切速度方向的一侧, 在剪切峰值之后, 随着结构面的破坏范围不断增大, 应力分布趋于均匀。

(3) 数值分析与室内模型试验都表明, 随着正应力的不断增大, 由结构面爬坡而引起的岩体体积增大的剪胀效应越来越小, 并且结构面的峰值强度不断增大, 表明, 当正应力不断增大时, 结构面发生爬坡滑移越来越困难, 结构面破坏深度不断增大, 峰值剪应力所对应的破坏模式逐渐变为直接剪断锯

齿破坏, 此时结构面抗剪强度基本上应为岩体中岩块抗剪强度。

(4) 通过数值模拟分析结果与室内模型试验结果的对比分析可知, 利用动力显式方法可以较好地模拟岩体结构面剪切过程中的爬坡张开、扭曲变形、破坏等特征, 所得到的模拟结果具有较高的可靠性。因此, 利用该方法可以为节理岩体力学特性、锚固岩体综合强度分析与计算提供可行的分析手段。

参考文献(References):

- [1] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 95.(XIA Caichu, SUN Zongqi. Engineering rock mass joint mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 95.(in Chinese))
- [2] GOODMAN R E. The mechanical property of joints[C]// Proceedings of the 3rd ISRM Congress. Denver: [s. n.], 1974: 127 - 140.
- [3] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249 - 268.
- [4] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕, 等. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 82 - 111.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan, et al. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 82 - 111.(in Chinese))
- [5] BARTON N, BAKHTAR K. Description and modelling of rock joint for the hydro-thermo-mechanical design of nuclear waste vaults[R]. [S. l.]: AECLTR - 418, 1987.
- [6] JAEGER J C. Friction of rocks and stability of rocks slopes[J]. Geotechnique, 1971, 21(2): 97 - 134.
- [7] PLESHA M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(4): 345 - 362.
- [8] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(3): 215 - 232.
- [9] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(SM3): 638 - 659.
- [10] 易成, 王长军. 两体接触面剪切力学行为的三维数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2149 - 2156.(YI Cheng, WANG Changjun. 3D numerical analysis of shear mechanical behavior for interface

- between interactional bi-body[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2 149 - 2 156.(in Chinese)
- [11] CROTTY J M, WARDLE L J. Boundary element analysis of piecewise homogeneous media with structural discontinuities[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3): 419 - 427.
- [12] SELVADURAI A P S, AU M C. Boundary element modeling of interface phenomena[C]// *Topics in Boundary Element Research*. Berlin: Springer Verlag, 1987: 112 - 126.
- [13] SELVADURAI A P S. The role of geomaterial interface degradation on the mechanics of a fracture[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. Vienna: [s. n.], 1995: 1 031 - 1 038.
- [14] 王卫华, 李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. *岩土工程技术*, 2005, 19(4): 177 - 181.(WANG Weihua, LI Xibing. A review on fundamentals of distinct element method and its applications in geotechnical engineering[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(4): 177 - 181.(in Chinese))
- [15] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997: 80, 204.(SHI Genhua. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis(DDA)[M]. Translated by PEI Juemin. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 80, 204.(in Chinese))
- [16] 邬爱清, 任放, 董学晟. DDA 数值模型及其在岩体工程上的初步应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(5): 411 - 417.(WU Aiqing, REN Fang, DONG Xuesheng. Numerical model of DDA and its application in rock engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(5): 411 - 417.(in Chinese))
- [17] 吴建宏, 大西有三, 石根华, 等. 三维非连续变形分析(3D DDA) 理论及其在岩石边坡失稳数值仿真中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(6): 937 - 942.(WU Jianhong, OHNISHI Yuzo, SHI Genhua, et al. Three-dimensional discontinuous deformation analysis (3D DDA) and its application to the rock slope topping[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(6): 937 - 942.(in Chinese))
- [18] 周维垣, 寇晓东. 无单元法及其工程应用[J]. *力学学报*, 1998, 30(2): 193 - 202.(ZHOU Weiyuan, KOU Xiaodong. Element-free method and its application in engineering[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1998, 30(2): 193 - 202.(in Chinese))
- [19] 栾茂田, 田荣, 杨庆, 等. 有限覆盖无单元法在岩土类弱拉型材料摩擦接触问题中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 137 - 141.(LUAN Maotian, TIAN Rong, YANG Qing, et al. Application of the finite-cover element-free method in friction contact problems of tension-weak geomaterials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 137 - 141.(in Chinese))
- [20] 黄岩松, 周维垣. 三维无单元法及其工程应用[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(6): 14 - 19.(HUANG Yansong, ZHOU Weiyuan. 3D element-free Galerkin method and its application in engineering[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(6): 14 - 19.(in Chinese))
- [21] 费康. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 94 - 96.(FEI Kang. The ABAQUS applied in the geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 94 - 96.(in Chinese))
- [22] 陆家佑. 岩体力学及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 15.(LU Jiayou. Rock mass mechanics and its applications[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011: 15.(in Chinese))
- [23] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266—1999 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 37 - 41.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50266—1999 Standard for tests method of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 1999: 37 - 41.(in Chinese))