

复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析

周文^{1,2}, 朱自强¹, 柳群义¹, 冯德山¹

1. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙, 410007)

摘要:采用FLAC^{3D}软件建立三维节理试样模型,分析不同表面形态和边界条件对节理强度和变形特征的影响。研究表明:当节理面起伏角较小时,试样剪切强度与正应力之间符合Mohr-Coulomb线性关系,起伏角对内摩擦角的影响大于对黏结力的影响;随着起伏角的增大,剪切强度与正应力之间逐渐呈非线性关系特征;通过抛物线方程对其进行拟合,可得到较高的相关性,并且节理的破坏模式从滑移破坏转变为沿节理面滑移和锯齿压剪碎裂的复合破坏;峰值强度与残余强度之比随正应力的增大而逐渐减小,减小趋势符合指数规律,同时,试样的各向异性逐渐减弱,剪切刚度不断增大。

关键词:节理;剪切强度;变形特征;数值分析

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2009)06-1700-05

Numerical analysis for shear strength and deformation characteristic of joint plane with complicated surface

ZHOU Wen^{1,2}, ZHU Zi-qiang¹, LIU Qun-yi¹, FENG De-shan¹

1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Highway Management Department of Hunan, Changsha 410007, China)

Abstract: The three dimensional numerical model for rock sample with joint plane was built by FLAC^{3D} software, and the effects of different surface shapes and boundary conditions on the shear strength and deformation characteristic of joint plane were analyzed. The analysis results show that, when the undulating angle of joint plane is small, the relationship between shear strength and normal stress is in accordance with Mohr-Coulomb linear criterion. The effect of the undulating angle on cohesion is in larger magnitude than that of undulating angle on friction angle. With the increase of undulating angle, the relationship between shear strength and normal stress is transferred to the non-linear criterion, which can be fitted by parabolic equation with high correlation coefficient, and the failure mode of joint changes from slipping along joint plane to the compound failure model consisted of slipping failure along joint plane and crushing failure through saw tooth. The ratio of peak strength to the residual strength decreases with the increase of the normal stress, and the relationship between them is in accordance with the exponential equation, while the degree of anisotropic characteristic for joint sample decreases, and shear stiffness increases.

Key words: joint; shear strength; deformation characteristic; numerical analysis

节理在岩体工程中广泛存在,它破坏了岩体的连续性和完整性,使岩体具有不均一性和各向异性,不

利于工程岩体的稳定。研究节理的剪切强度和变形特征具有重要意义。许多研究者采用室内试验或者理论

收稿日期: 2008-12-29; 修回日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40804027); 教育部博士点基金资助项目(200805331082); 湖南省科技计划项目(2008TP4013-2)

通信作者: 冯德山(1978-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 从事地球物理勘探研究; 电话: 0731-88836145; E-mail: fengdeshan@126.com

分析对节理特性进行研究^[1-13],如:蒋宇静等^[6]在恒定法向荷载和恒定法向刚度的边界条件下,研究了不同接触状态下岩石断裂节理试件剪切过程中力学性能的变化情况;李海波等^[8]利用人工浇筑表面为锯齿状的混凝土岩石节理试样,研究不同剪切速率下各种岩石节理的强度特征,并提出考虑不同剪切速率的岩石节理峰值强度模型;杜守继等^[9]基于不规则的人工岩石节理经历不同剪切变形历史的剪切试验,分析了岩石节理剪切变形特性及与变形过程的依存关系;许宏发等^[10]在分析了岩体节理剪切变形常用双曲线模型和指数模型的基础上,提出了一种幂函数模型;Jafari等^[11-13]研究了节理在循环剪切荷载作用下的应力应变特征。采用理论方法能够反映岩体的一般规律,但只能针对简单几何模型进行分析。采用实验方法能够较好地反映岩石的特性,但耗资较大。近年来,随着计算机技术的不断发展,采用数值分析方法研究岩土工程问题成为新的趋势,为岩土工程设计提供了新的方法,但目前人们采用该方法研究节理剪切特征还较少,在此,本文作者利用数值方法中的基于拉格朗日差分法 FLAC^{3D} 软件建立三维节理试样模型,分析不同表面形态和边界条件对节理强度和变形特征的影响。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

由于天然岩石节理取样困难及表面粗糙度难以界定等,目前对岩石节理的室内试验研究所采用的试样基本上都是人工岩石节理,多采用混凝土浇筑而成^[8]。本文利用 FLAC^{3D} 软件,根据自编的 ANSYS-FLAC^{3D} 接口程序建立试样模型(见图 1),其长×宽×高为 4 m×4 m×4 m,节理面起伏厚度为 0.15 m;为了保证节理边界和形态的一致性,分别布置起伏次数,为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 和 16,得到节理面起伏角 α 分别为 0°, 9°, 17°, 24°, 31°, 37°, 42°, 46°和 50°。试件加载方式为位移加载,加载速率 v 为 $(0.05\sim 4.00)\times 10^{-5}$ mm/步;边界条件为节理下盘各面约束法向位移,节理根据剪切速率运动,试样顶部施加的正应力变化范围为 0.05~0.90 MPa;计算参数如下:对岩石,重度为 23 kN/m³,泊松比为 0.20,黏结力为 0.3 MPa,内摩擦角为 37°,膨胀角为 10°,抗拉强度为 0.4 MPa;对节理面,法向刚度为 10.0 MPa/m,切

向刚度为 10.0 MPa/m,黏结力为 10.0 kPa,内摩擦角为 20°,膨胀角为 6°。

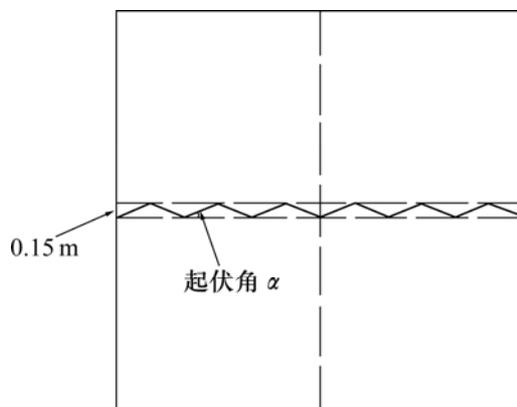


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

1.2 节理面特性

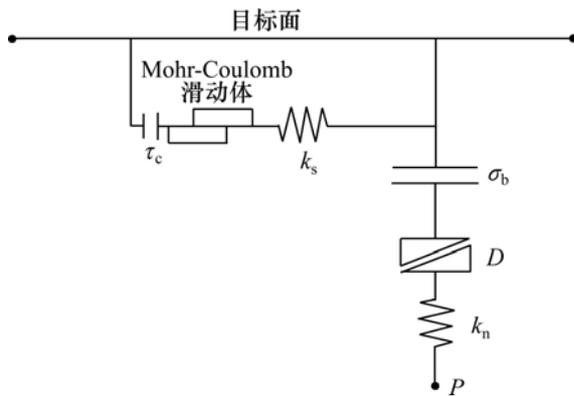
采用 INTERFACE 接触面对节理面进行模拟。节理面由一系列三角形单元组合而成,每个三角形单元包含 3 个节点,每个接触面的节点都有 1 个相关联的特征面积,可通过面积权重进行换算^[14]。一般来说,接触面单元和实体单元的表面黏合在一起;若实体单元由四边形平面组成,则将其拆分为 2 个三角形接触面单元;当发生接触时,节点的性质由法向刚度、切向刚度及滑动的相关性质决定;这种基本的接触关系通过接触面节点和实体单元外表面(目标面)建立,接触力的法向方向也由目标面的法向方向决定。

图 2 所示为接触面节点的受力特征。在每一步中,对接触面节点和接触的目标面来说,首先计算相应的法向和切向速度,然后,通过差分形式进一步计算法向力和剪切力;接触面的破坏模型符合 Mohr-Coulomb 拉剪强度准则,当剪应力或者拉应力达到相应强度时,会在接触的目标面上形成有效法向应力增量,具体计算公式如下:

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A ; \quad (1)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+\Delta t/2)} A + \sigma_{si} A 。 \quad (2)$$

式中: $F_n^{(t+\Delta t)}$ 为第 $(t+\Delta t)$ 时步中的法向力; $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ 为 $(t+\Delta t)$ 时步中的剪切力; u_n 为接触面节点插入目标面的法向渗透距离; Δu_{si} 为相对剪切位移增量; σ_n 为接触面的正应力。



σ_b 为抗拉强度 ; τ_c 为剪切强度 ; D 为膨胀角 ; k_s 为切向刚度 ; k_n 为法向刚度

图 2 接触面节点的受力特征

Fig.2 Mechanical characteristic of structure node

表 1 正应力和剪切强度的拟合关系

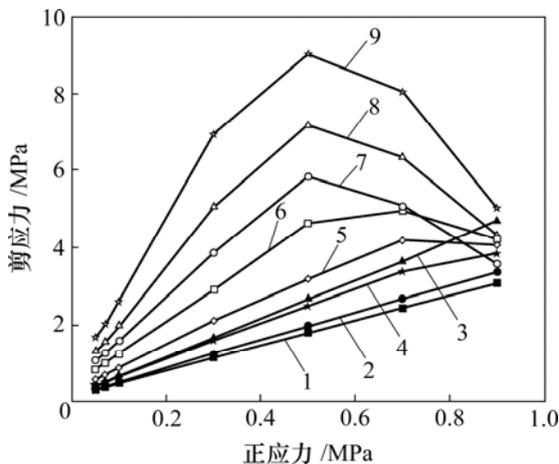
Table 1 Fitting relationship between σ_n and τ_c

拟合方程	起伏角 / (°)	a_1	a_2	a_3	R
$\tau_c = a_1 + a_2 \sigma_n$	0	0.160 4	3.282 0		0.999 9
	9	0.158 3	3.586 0		0.999 8
	17	0.191 1	4.965 0		0.999 9
$\tau_c = a_1 + a_2 \sigma_n + a_3 \sigma_n^2$	24	0.142 0	5.520 0	-1.493 9	0.998 3
	31	0.098 0	8.558 0	-4.458 0	0.991 7
	37	0.038 9	13.857 0	-10.082 0	0.987 8
	42	-0.036 6	19.493 0	-17.151 0	0.981 2
	46	-0.088 7	24.923 0	-22.232 0	0.989 8
	50	-0.137 4	33.115 0	-30.396 0	0.996 2

注 : R 为相关系数。

2 结果与讨论

不同起伏角时正应力 σ_n 和剪切强度 τ_c 之间的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 当 $\alpha = 17^\circ$ 时, τ_c 与 σ_n 之间符合线性关系, 并且曲线的斜率逐渐增大, 说明起伏角对内摩擦角的影响大于对黏结力的影响; 随着 α 的增大, 两者之间逐渐呈现非线性关系, 通过抛物线方程对其进行拟合, 可得到较高的相关性, 如表 1 所示。另外, 对于相同的 σ_n , 并非 α 越大, 剪切强度便越大, 对比 $\alpha=17^\circ$ 和 $\alpha=24^\circ$ 对应的 2 条曲线可以看出, $\alpha=17^\circ$ 时的剪切强度反而高于 $\alpha=24^\circ$ 时的剪切强度, 这是由于 α 于 $17^\circ \sim 24^\circ$ 变化, 试样的破坏模式发生变化, 从沿节理面的滑移破坏转变为节理面滑移和锯齿压剪碎裂的复合破坏(见图 4)。



起伏角/(°): 1—0; 2—9; 3—17; 4—24; 5—31; 6—37; 7—42; 8—46; 9—50

图 3 不同起伏角下正应力和剪切强度之间的关系
Fig.3 Relationships between σ_n and τ_c under different undulating angles

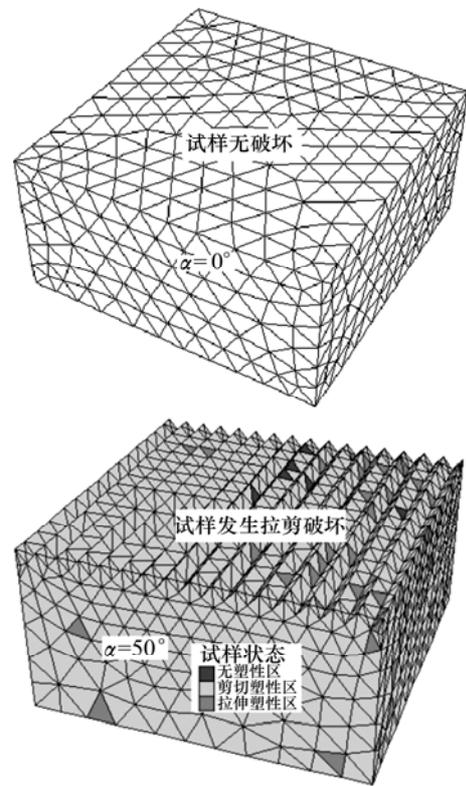
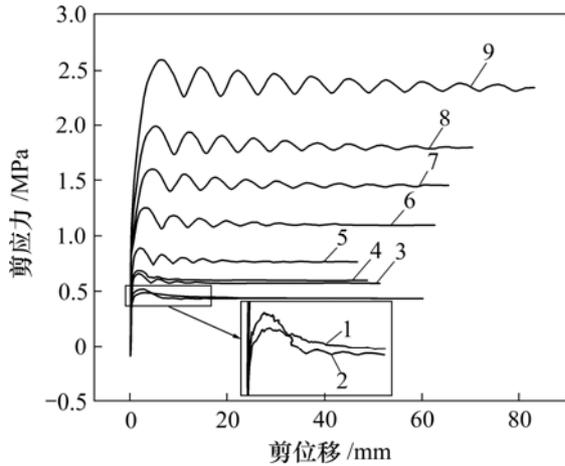


图 4 试样破坏模式

Fig.4 Failure modes of joint sample

正压力为 0.1 MPa 时剪应力—剪位移之间的关系见图 5。从图 5 也可看出, 不同 α 对应的曲线形式也不相同, α 较小时为单峰值曲线, 此时主要发生沿节理面的滑移剪切破坏; 当 $\alpha > 17^\circ$ 时, 曲线为多峰值曲线, 这是由于此时发生复合破坏, 随着剪位移的增大, 试样迅速达到峰值强度, 第 1 个锯齿被剪坏, 发生应力跌落; 随着剪切位移继续增大, 剩余锯齿共同发挥作用, 抵抗剪切进程, 然后, 这些锯齿也逐个被剪坏。由于锯齿数不断减少, 表现出剪应力峰值也逐渐减小,

因此, 可根据试样的破坏形式将其分为 2 组: a. $\alpha < 24^\circ$; b. $\alpha \geq 24^\circ$ 。对于第 2 组, 当 σ_n 较小时, 剪切强度随 α 的增大而增大, 但 σ_n 较大时, 该规律则不再适用, 这是由于在较大正应力作用下, 部分锯齿被压坏, 从而降低了其抗剪强度; 而第 1 组试样的强度均随着 α 的增大而增大, 这是由于其起伏角较小, 不易被压碎, 这与文献[8, 11]中的试验结果相同。



起伏角/(°): 1—0; 2—9; 3—17; 4—24; 5—31; 6—37; 7—42; 8—46; 9—50

图 5 正压力为 0.1 MPa 时剪应力和剪位移之间的关系

Fig.5 Relationships between shear stress and shear displacement under normal stress of 0.1 MPa

根据 Mohr-Coulomb 准则, 当 $\alpha=0^\circ\sim 17^\circ$ 时, 可得到相应等效黏结力和内摩擦角, 如表 2 所示; 另外, 根据下式计算 c 的提高幅度 ξ_c 和 $\tan \phi$ 的提高幅度 ξ_ϕ (见表 2):

$$\xi_c = (c_{\alpha e} - c_j) / c_j \times 100\% ; \quad (3)$$

$$\xi_\phi = (\tan \phi_{\alpha e} - \tan \phi_j) / \tan \phi_j \times 100\% . \quad (4)$$

式中: $c_{\alpha e}$ 和 $\phi_{\alpha e}$ 分别为起伏角 α 对应的等效黏结力和

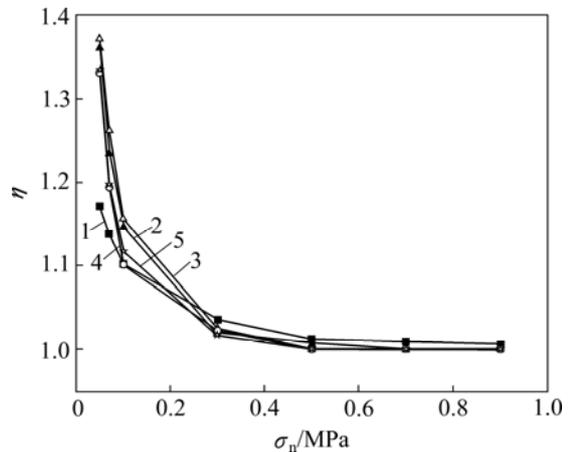
表 2 第 1 组试样 Mohr-Coulomb 准则拟合结果

Table 2 Fitting results for the first set of samples with Mohr-Coulomb criterion

起伏角/ (°)	等效黏结 力 σ_c /MPa	等效内摩擦 角 ϕ /(°)	ξ_c /%	ξ_ϕ /%
0	0.160 48	73.06	15 048	801.8
9	0.158 30	74.42	14 830	885.4
17	0.191 15	78.61	18 115	1 264.3

内摩擦角; c_j 和 ϕ_j 分别为节理面的原始黏结力和内摩擦角。可以看出, 等效黏结力和内摩擦角与原始节理面的黏结力和内摩擦角相比有较大提高, 并且黏结力的提高幅度大于内摩擦角的提高幅度。

为了反映起伏角以及正应力对试样各向异性特征的影响, 记录峰值强度与残余强度之比 η 随 σ_n 和 α 的变化规律, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, η 随着 σ_n 的增大而逐渐减小, 减小趋势符合指数方程规律 (见表 3), 说明试样的各向异性特征逐渐减弱; 并且 α 越大, 曲线越陡, 相同 σ_n 引起的 η 变化越大, 但 η 的最大值并不发生在 $\alpha=50^\circ$ 处, 而是发生在 $\alpha=31^\circ$ 处, 此时, $\eta = 1.388 13$; 另外, 以 $\alpha=0^\circ$ 的试样为例, 当 σ_n 于 0.1~0.9 MPa 变化时, 试样达到峰值强度所对应的位移分别为 2.7, 2.9, 3.5, 5.4 和 6.8 mm, 说明正



起伏角/(°): 1—0; 2—17; 3—31; 4—42; 5—50

图 6 η 与正应力 σ_n 的关系

Fig.6 Relationship between η and σ_n

表 3 η 与正应力关系的拟合

Table 3 Fitting for relationship between η and σ_n

拟合方程	起伏角/ (°)	a_1	a_2	a_3	R
$\eta = a_1 + a_2 \exp(a_3 \sigma_n)$	0	1.009 8	0.247 2	-9.133 6	0.993 3
	9	1.003 7	0.559 4	-11.118 7	0.998 9
	17	1.005 7	0.910 6	-19.107 6	0.997 3
	24	1.008 7	0.971 1	-18.964 6	0.996 6
	31	1.004 8	0.866 4	-17.322 9	0.997 6
	37	1.004 7	1.014 3	-20.062 0	0.997 5
	42	1.005 6	1.148 9	-25.381 8	0.995 9
	46	1.001 4	1.161 8	-24.468 3	0.997 4

应力越大, 曲线达到峰值强度的位移越小, 试样的剪切刚度越大。

3 结 论

a. 当节理面起伏角较小时, 试样剪切强度与正应力之间符合 Mohr-Coulomb 线性关系, 起伏角对内摩擦角的影响大于对黏结力的影响, 随着起伏角的增大, 两者之间逐渐呈现非线性抛物线关系特征; 节理的破坏模式从滑移破坏转变为沿节理面滑移和锯齿剪碎的复合破坏。

b. 峰值强度与残余强度之比 η 随着正应力 σ_n 的增大而逐渐减小, 减小的趋势基本符合双曲线方程, 试样的各向异性特点逐渐减弱, 并且试样的刚度不断增大。

参考文献:

- [1] 许万忠, 彭振斌, 胡毅夫, 等. 岩体边坡锚注加固模拟试验研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 6-10.
XU Wan-zhong, PENG Zhen-bin, HU Yi-fu, et al. Simulation experiment study on the treatment of bolting and grouting in rock slope reinforcement[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 6-10.
- [2] 王卫华, 李夕兵, 周子龙, 等. 不同应力波在张开节理处的能量传递规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 376-380.
WANG Wei-hua, LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, et al. Energy-transmitted rule of various stress waves across open joint[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 376-380.
- [3] WANG Wei-hua, LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping, et al. Closure behavior of rock joint under dynamic loading[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3): 408-414.
- [4] 杨松林, 张建民, 黄启平. 节理岩体蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1225-1228.
YANG Song-lin, ZHANG Jian-min, HUANG Qi-pin. Analysis of creep model of jointed rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1225-1228.
- [5] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 10-16.
BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Research on the strength behaviour of rock containing coplanar close in intermittent joints by direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 10-16.
- [6] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2254-2259.
JIANG Yu-jing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2254-2259.
- [7] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1719-1724.
LIU Yuan-ming, XIA Cai-chu. Advances in research of rock masses containing discontinuous joints in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1719-1724.
- [8] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435-2440.
LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2435-2440.
- [9] 杜守继, 朱建栋, 职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 56-60.
DU Shou-ji, ZHU Jian-dong, ZHI Hong-tao. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 56-60.
- [10] 许宏发, 金丰年. 岩体节理剪切变形的幂函数模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 314-317.
XU Hong-fa, JIN Feng-nian. Power function model of shear deformation for rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 314-317.
- [11] Jafari M K, Hosseini K A, Pellet F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 619-630.
- [12] Lee H S, Park Y J, Cho T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 967-980.
- [13] Fox D J, Kana D D, Hsiung S M. Influence of interface roughness on dynamic shear behavior in jointed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 923-940.
- [14] Itasca Consulting Group. Theory and background[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.