

doi : 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.10.024

岩壁变形条件下结构面法向变形特征

乔丽苹<sup>1</sup>,李 旗<sup>1</sup>,王者超<sup>2</sup>,杨 磊<sup>2</sup>

( 1. 山东大学 土建与水利学院,山东 济南 250061 ;2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心,山东 济南 250061 )

**摘 要：**开展了无周边约束条件下不同岩壁厚度结构面法向变形试验,结合结构面-岩壁系统刚度与系统厚度之间关系,得到了不同岩壁厚度条件下结构面-岩壁系统整体刚度的变化特征,以及岩体结构面刚度与结构面厚度、分析了不同周边约束条件下结构面刚度与闭合量之间的关系,提出了考虑岩壁变形条件下结构面法向变形本构模型及其适用条件.进一步讨论了岩壁-结构面系统的结构和材料特征,分析了结构面法向刚度合理试验方法的重要性.本研究将有利于加深对结构面法向变形特征的理解与认识.

**关 键 词：**岩石力学;结构面;法向变形;法向刚度;可变形岩壁;本构模型

**中图分类号：**TU 452      **文献标志码：**A      **文章编号：**1005-3026(2016)10-1479-06

Normal Deformation Behavior of Rock Joint with Deformable Rock Wall

QIAO Li-ping<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, WANG Zhe-chao<sup>2</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

( 1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China. Corresponding author: WANG Zhe-chao, E-mail: wanz@sdu.edu.cn )

**Abstract :** The rock joint normal tests of rock wall with different thickness were conducted without lateral confinements. Based on the test data, the relation between the stiffness and thickness of joint-rock wall system was analyzed, and the stiffness properties of joint-rock wall system with different thickness were obtained. The relations between the normal stiffness and closure of the joint under different confinement manners were analyzed, and a constitutive model for the normal deformation of rock joints with deformable rock walls was proposed. Furthermore, the structural and the material properties of the joint-rock wall system were discussed, and the test technique of the rock joint normal test was deemed important. This study will be helpful for understanding the rock joint normal deformation properties.

**Key words :** rock mechanics; rock joint; normal deformation; normal stiffness; deformable rock wall; constitutive model

岩体结构面的研究始于 20 世纪 70 年代,以 Muller 为代表的奥地利学者最早认识到结构面对岩体力学性质起到了决定性的作用<sup>[1]</sup>,并历史性地把岩石力学研究重点从岩块力学转移到了岩体力学上来.在国内,谷德振等<sup>[2]</sup>在 20 世纪 70 年代提出了岩体结构的观念和岩体结构控制着岩体稳定性的观点.

在 20 世纪 80 年代,孙广忠<sup>[3]</sup>在系统研究和总结了结构面影响岩体变形和破坏的基本规律的

基础上,提出了“岩体结构控制论”.

结构面力学性质的研究重点在于结构面的变形与强度,而结构面法向变形特征研究是结构面力学和水力学特征的研究基础.基于结构面法向变形试验结果,文献[4-6]分别提出了半对数、双曲线和指数函数本构模型,描述结构面法向变形与法向应力关系.此后,文献[7-8]在 Goodman 双曲线模型基础上建立了 BB 弹性非线性模型,而文献[9]提出了结构面法向变形三参

数本构模型 ,该模型可视为指数模型和 BB 模型  
的统一模型. Hertz 接触模型是经典接触力学的基础 ,至今仍然是研究和分析表面接触问题的重要  
理论之一. 在 Hertz 接触理论上 ,文献 [ 10 -  
12 ]认为结构面的非线性特征是由于正应力的增  
大引起了接触面和接触点数的增加 ,并各自提出  
了岩石结构面法向变形特征的本构模型.

在以往试验研究中 ,多数情况下结构面周边  
施加刚性约束 ,并假设结构面岩壁为刚体. 在此条  
件下 ,结构面呈现硬化特征 ,其刚度随应力增加而  
增加. 但在实际岩体工程中 ,结构面受力情况复  
杂 ,其约束条件并不一定处于位移约束条件 ,而是  
与问题应用背景、结构面规模产状和应力条件等  
密不可分 [ 13 ]. 在非刚性约束条件下岩壁可发生变  
形 ,从而导致结构面性质发生变化. 本研究分析了  
结构面 - 岩壁系统刚度与系统厚度之间的关系 ,  
开展了无周边约束条件下不同岩壁厚度结构面法  
向变形特征研究 ,得到了不同岩壁厚度条件下结  
构面 - 岩壁系统整体刚度变化特征 ,获得了岩体  
结构面刚度与结构面厚度 ,分析了不同周边约束  
条件下结构面刚度与闭合量之间的关系 ,提出了  
考虑岩壁变形条件下结构面法向变形本构模型.  
本研究为建立结构面室内试验所获参数与工程应  
用参数之间关系提供依据 ,并将有利于加深对结  
构面法向变形特征的理解与认识.

1 结构面 - 岩壁系统刚度

根据结构面与岩壁组合形式 ,系统可表示为  
由结构面和岩壁串联组成. 如图 1 所示 ,假设系  
统、结构面、岩壁刚度分别用  $K, K_j, K_w$  表示 ,则系  
统刚度可表示为

$$K = \frac{K_w K_j}{K_w + 2K_j} . \tag{1}$$

在岩壁为刚体条件下 ,岩壁刚度趋于无限大 ,  
此时 ,由式 ( 1 )可得

$$( K )_{K_w \rightarrow +\infty} = K_j . \tag{2}$$

而在允许岩壁变形条件下 ,假设岩壁为弹性 ,  
则岩壁刚度取决于岩壁面积、厚度和弹性模量 ,即

$$K_w = \frac{EA}{l_w} . \tag{3}$$

式中  $E, A, l_w$  分别为岩壁弹性模量、面积和厚度.

图 1 中  $l$  为结构面 - 岩壁系统厚度  $l_j$  为结构  
面厚度. 由式 ( 1 )和 ( 3 )可知 :

1 ) 当系统厚度为 2 倍结构面厚度时 ,系统刚  
度趋近于结构面刚度 ;

2 ) 当系统厚度趋于无限大时 ,岩壁刚度趋于  
零 ,此时系统刚度趋近于零 ;

3 ) 当岩壁刚度为 2 倍结构面刚度时 ,系统刚  
度为结构面刚度的一半.

假设系统厚度为  $l_E$  时 ,岩壁刚度为结构面刚  
度的 2 倍. 根据上述关系 ,同时考虑到系统刚度在  
其厚度 0 至  $l_E$  区间衰减速度要小于在  $l_E$  至无限  
大区间衰减速度 ,因此可假设系统刚度与系统厚  
度对数之间符合反双曲正切函数 ,如图 2 所示.

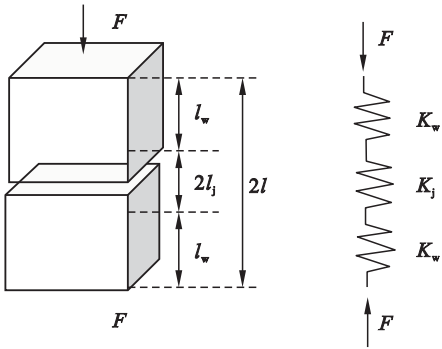


图 1 结构面 - 岩壁系统刚度  
Fig. 1 Stiffness of rock joint-rock wall system

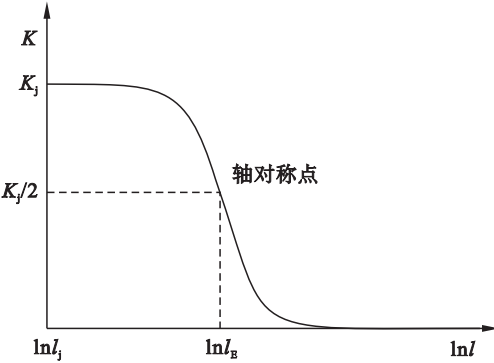


图 2 结构面 - 岩壁系统刚度与系统厚度的对数关系  
Fig. 2 Stiffness of rock joint-rock wall system versus  
logarithm of system thickness

系统刚度与系统厚度关系表达式为

$$K = \frac{K_j}{2} \text{arth} ( \ln l - \ln l_E ) . \tag{4}$$

式中 ,  $l$  为系统厚度. 若令  $l_n = \ln l, l_e = \ln l_E$  ,则式  
( 4 )为

$$K = K_j \frac{l_n^2}{l_n^2 + l_e^2} . \tag{5}$$

式 ( 5 )为系统刚度与系统厚度对数之间的关系 ,  
其中参数为结构面刚度  $K_j$  和系统特征厚度的对  
数  $l_e$ .

根据式 ( 5 ) ,开展不同岩壁厚度下结构面法  
向加载试验 ,获得对应系统刚度 ,则可将试验数据  
与式 ( 5 )拟合 ,获得结构面刚度与系统特征厚度.

2 结构面试验及结果

2.1 试验方法

试样取自某地下水封石油洞库库址,为花岗片麻岩,完整岩块单轴饱和抗压强度约为 90 MPa. 为保证试样的重复性,岩石结构面采用人工切割而成. 结构面形状为圆形,直径为 50 mm. 切割后结构面表面较为光滑,其结构面粗糙系数不大于 1.

2.2 试验结果及分析

图 3 为不同岩壁厚度试样的法向应力与系统

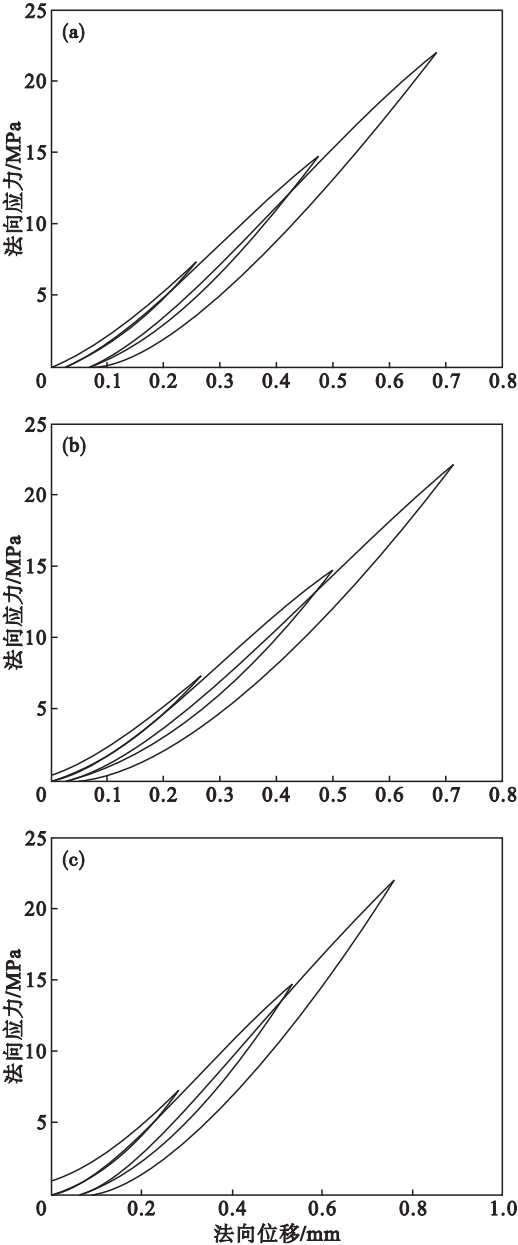


图 3 不同厚度岩壁结构面法向应力 - 位移曲线  
Fig. 3 Normal stress-displacement curves of specimens with different rock wall thickness  
( a )— 4 cm ; ( b )—5 cm ; ( c )—8 cm.

位移的关系曲线. 为了分析不同应力下结构面加载卸载特性,分别在 7.4 ,14. 8 和 22. 2 MPa 施加了 3 个卸载过程. 图中数据显示随着法向应力增加,系统刚度不断增加,而在同一法向应力条件下,系统位移随岩壁厚度的增加而增加. 以卸载过程割线刚度作为系统刚度,采用式 ( 4 )拟合系统刚度与系统厚度关系,如图 4 所示,参数取值如表 1 所示.

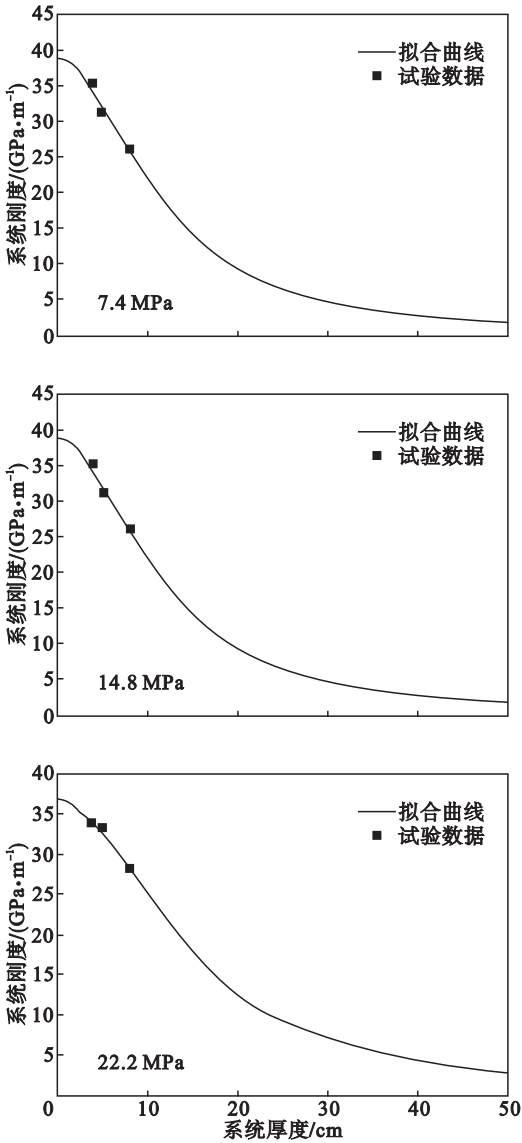


图 4 不同法向应力下系统刚度 - 厚度关系曲线  
Fig. 4 Stiffness versus thickness under different normal stresses

表 1 不同法向应力下法向刚度与  $l_E$  值  
Table 1 Normal stiffnesses and  $l_E$  under different normal stresses

法向应力/MPa	法向刚度 $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	$l_E/\text{mm}$
7. 4	30. 64	11. 83
14. 8	38. 72	11. 20
22. 2	36. 76	14. 51

对于图 1 所示结构面-岩壁系统,由圣维南原理可知,结构面在岩壁内部影响范围是一定的,即在工程实际中结构面有一定的厚度.由式(1)可知,若已知结构面法向刚度和整体刚度,则可以计算得到材料自身的刚度,即

$$K_w = \frac{2KK_j}{K_j - K} \quad (6)$$

由式(3)得到岩壁厚度(未受其结构面影响) $l_w$ ,从而得到结构面厚度 $l_j$ :

$$l_j = l/l_w \quad (7)$$

据此,根据岩块单轴压缩试验获得的弹性模量,可以计算不同岩壁厚度不同法向应力卸载条件下 $K_w$ 和 $l_j$ 取值,分别如表2所示.

对于任一岩壁-结构面系统,随荷载的增加,结构面厚度增加,所占材料自身的体积分数也增加;在一定荷载作用下,随试样长度的增加,结构面厚度增加,但所占材料自身的体积分数却在降低.

表2 不同厚度试样在不同法向应力下 $K_w$ , $l_j$ 及 $\eta$ 值  
Table 2  $K_w$ ,  $l_j$  and  $\eta$  values of systems with different thickness and under different normal stresses

$l_w$	$K_w/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$			$l_j/\text{cm}$			$\eta$		
cm	7.4	14.8	22.2	7.4	14.8	22.2	7.4	14.8	22.2
4	577	774	871	0.356	0.303	0.281	0.91	0.92	0.93
5	319	316	686	0.644	0.742	0.357	0.87	0.85	0.93
8	136	158	239	1.516	1.482	1.025	0.81	0.81	0.87

### 3 岩壁变形时法向变形本构模型

#### 3.1 问题的提出

现有结构面法向变形模型主要有双曲模型、指数模型和对数模型.模型一般具有参数少、拟合简单等优点.为使这些模型更好地描述复杂条件下结构面法向变形特征,学者对这些模型不断进行修正.文献[14]在经典指数模型基础上提出了统一指数模型,文献[9]提出了可统一表达指数和双曲线模型特征的变参数对数模型.这些模型,在未大量增加模型参数基础上,可描述复杂条件下结构面法向变形特征.在上述模型中,大多采用了结构面初始刚度与节理法向最大允许闭合量作为模型参数.图5所示模型表达式均需满足以下条件:

$$K_i = (K_j)_{d \rightarrow 0}, \quad (8)$$

$$(K_j)_{d \rightarrow d_{\max}} = +\infty. \quad (9)$$

式中: $K_i$ 为结构面初始法向刚度; $d$ 为结构面闭合

量; $d_{\max}$ 为结构面最大闭合量.

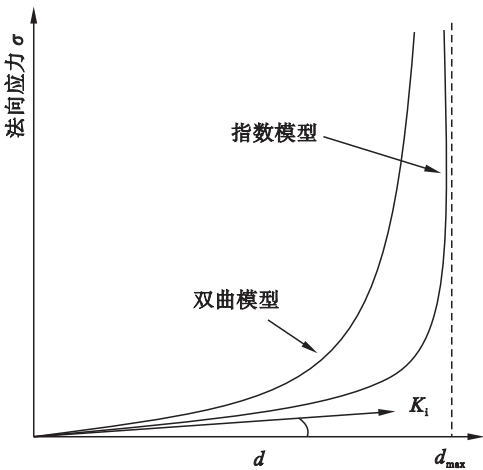


图5 周边约束条件下结构面法向变形模型满足的边界条件

Fig. 5 Boundary conditions for normal deformation model of joints with lateral confinement

大量试验结果表明,结构面的初始法向刚度和结构面最大闭合量受结构面粗糙系数、岩壁压缩强度和结构面隙宽影响.但在上述结构面最大闭合量及结构面刚度趋于无限大时是基于刚性岩壁假定,在此假定条件下,随着法向应力增加,结构面闭合量趋近最大值.由岩壁-结构面组成的系统性质趋近于刚体,导致其刚度趋于无限大.但在实际情况下,岩壁是可变形的,其刚度与受力状态相关,因此结构面-岩壁系统并非一个刚性系统.

首先考虑周边刚性约束条件下结构面刚度的变化特征.如图6a所示,结构面-岩壁系统周边为固定位移边界条件.此时,结构面不但受到法向应力作用,还受到由于侧限边界引起的反作用力.结构面所受侧向应力大小与法向应力和侧压力系数相关.由于处于三向受力状态,岩壁将呈现硬化性质,因此系统刚度不断增大,结构面所承受的法向应力也趋于无限大.这也是现有模型多满足式(9)的原因.

考虑周边无约束条件下结构面刚度的变化特征.如图6b所示,岩壁-结构面系统周边为自由边界条件.结合岩块和结构面力学特性,分析结构面法向刚度随闭合量的变化趋势.无约束条件下,结构面刚度先随闭合量的增加而增加,但随着闭合量的增加,岩壁厚度不断增加,导致结构面刚度增长速度变缓,直至出现最大值;此后,当法向应力达到岩壁单轴抗压强度时,结构面刚度为零.而刚度最大值与岩壁厚度、岩壁力学特征及地应力密切相关,例如体变将引起岩壁力学性质发生变

化<sup>[15]</sup>. 综上所述,考虑岩壁变形条件下,结构面法向刚度与闭合量关系如图 7 所示.

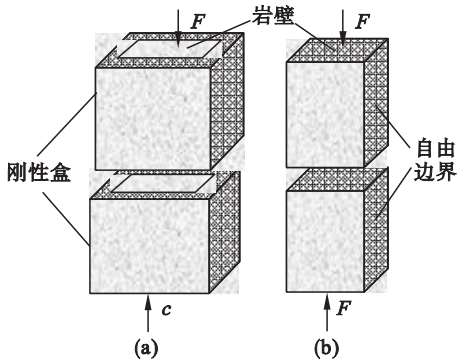


图 6 不同约束条件下的结构面  
Fig. 6 Rock joints with different lateral confinement  
(a)—刚性约束;(b)—无约束.

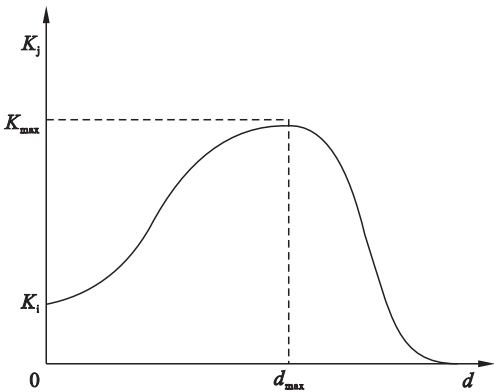


图 7 岩壁变形条件下结构面刚度-闭合量关系  
Fig. 7 Stiffness-closure relation for rock joint with deformable rock wall

而实际条件下,结构面所处应力条件较为复杂,多数条件下其边界介于上述两种情况之间.

3.2 模型表达式

根据上述讨论,在考虑岩壁变形条件下,结构面法向刚度需满足以下 2 个条件:

$$K_i = (K_j)_{d \rightarrow 0}, \tag{10}$$

$$(K_j)_{d \rightarrow d_{\max}} = K_{\max}. \tag{11}$$

式中,  $K_{\max}$  为结构面最大刚度,根据应用背景,可取不同物理含义对应值. 根据上述关系,选用双曲正切函数描述闭合量在 0 至  $d_{\max}$  区间结构面法向刚度与闭合量之间关系:

$$K_j = K_i + \lambda \operatorname{th}(d). \tag{12}$$

式中,

$$\lambda = \frac{K_{\max} - K_i}{\operatorname{th}(d_{\max})}.$$

式(12)对闭合量  $d$  积分得

$$\sigma = \lambda \ln(e^{2d} + 1) - \lambda d + K_i d + B. \tag{13}$$

由初值条件  $d=0$  时  $\sigma=0$ ,得  $B = -\lambda \ln 2$ ,

即,考虑岩壁变形条件下法向应力与闭合量关系式为

$$\sigma = K_i d + \lambda \left( \ln \frac{e^{2d} + 1}{2} - d \right). \tag{14}$$

3.3 模型验证

采用式(14)(本文模型)对试验数据进行拟合. 拟合时,将位移分解为岩壁变形位移和结构面闭合位移,其中岩壁变形位移通过材料的弹性模量、泊松比和岩壁厚度求解. 拟合参数如表 3 所示. 模型预测结果与试验结果对比如图 8 所示. 此外,还与 BB 模型进行了对比. 从图中不难看出,本文提出的考虑岩壁变形的结构面法向变形模型较好地反映了结构面法向变形特征.

表 3 结构面 BB 模型和本文模型参数  
Table 3 Parameters for Barton-Bandis model and eqn. 14

模型	参数		相关系数
BB 模型	$K_i = 13.7 \text{ MPa}$	$d_{\max} = 1.3 \text{ mm}$	0.963
式(14)	$K_i = 9.2 \text{ MPa}$	$\lambda = 59.6 \text{ MPa}$	0.992

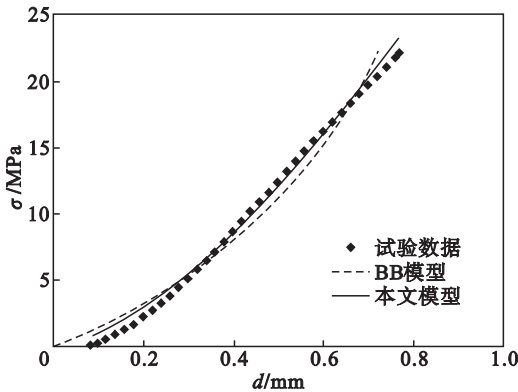


图 8 本文模型、BB 模型与试验数据对比  
Fig. 8 Comparison of test data with Barton-Bandis model and eqn. 14

4 讨 论

结构面法向变形特征是结构面的基础力学性质,相关研究成果对深入理解结构面力学和水力学特征具有重要意义. 然而,多数已有研究均将岩壁简化为刚体,将由结构面-岩壁组成的系统作为结构问题来处理,没有考虑岩壁变形对系统性质的影响. 但考虑岩体工程实际情况,岩壁-结构面系统处于复杂的应力状态,系统刚度不但与结构面特征密切相关,而且与岩壁变形特征紧密相关. 因此对结构面-岩壁系统特征的研究,不能仅关注其结构特征,还需关注其系统组成部分的材料特征.

离散单元法在裂隙岩体问题求解中应用日益

广泛. 在求解具体问题时 ,测试合适参数尤为重要. 根据本文研究 ,结构面法向刚度取值与结构面受力特征和岩壁厚度密不可分 ,因此 ,在具体应用中 ,需要根据具体工况 ,选取合适参数和边界条件 ,才能获得较为可靠的计算结果. 此外 ,根据本文讨论 ,在高应力及岩壁变形条件下 ,结构面法向刚度通常要小于不考虑岩壁变形条件下的取值. 采用固定侧限结构面变形试验获得的结构面法向刚度要比实际情况大 ,获得的参数预测位移值往往要比实际情况小.

## 5 结 论

- 1 ) 开展了无周边约束条件下不同岩壁厚度结构面法向变形试验 ,获得了其法向变形刚度与岩壁厚度的关系.
- 2 ) 提出了结构面法向刚度与岩壁厚度的关系表达式 ,结合试验数据 ,得到了结构面法向刚度与厚度.
- 3 ) 分析了不同应力状态下结构面法向刚度与应力之间的关系 ,提出了考虑岩壁变形条件下结构面法向变形本构模型应满足的条件.
- 4 ) 提出了考虑岩壁变形条件下结构面法向变形本构模型 ,并进行了验证.
- 5 ) 讨论了岩壁 – 结构面系统的结构和材料特征 ,分析了结构面法向刚度合理试验方法的重要性.

### 参考文献 :

[ 1 ] Muller L. The use of deformation measurements in dimensioning the lining of subway tunnels[ C ]//International Symposium on Field Measurements in Rock Mechanics. Zurich ,1977 2 :451 – 471.

[ 2 ] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[ M ]. 北京 :科学出版社 ,1979.  
( Gu De-zhen. Fundamentals of rock engineering geomechanics [ M ]. Beijing :Science Press ,1979. )

[ 3 ] 孙广忠. 岩体结构力学[ M ]. 北京 :科学出版社 ,1988.  
( Sun Guang-zhong. Mechanics of rock mass structure [ M ]. Beijing :Science Press ,1988. )

[ 4 ] Shehata W M. Geohydrology of Mount Vernon Canyon area

[ D ]. Golden :Colorado School of Mines ,1971.

[ 5 ] Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[ M ]. New York :West Group ,1976 :472 – 490.

[ 6 ] Swan G. Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurement[ J ]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* ,1983 ,16 :19 – 38.

[ 7 ] Bandis S C ,Lumsden A C ,Barton N R. Fundamentals of rock fracture deformation[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* ,1983 20( 6 ) :249 – 268.

[ 8 ] 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.

[ 9 ] 俞缙 ,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 ,30( 9 ) :1316 – 1341.  
( 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 ,30( 9 ) :1316 – 1341. )

[ 10 ] Sun Z ,Gerrard C ,Stephansson O. Rock joint compliance tests for compression and shear loads[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* ,1985 22( 4 ) :197 – 213.

[ 11 ] 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 and Mining Sciences* 2001 38( 5 ) :607 – 619.

[ 12 ] Xia C C ,Yue Z Q ,Tham L G ,et al. Quantifying topography and closure deformation of rock joints[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,2003 ,40 ( 7 ) :197 – 220.

[ 13 ] 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. )

[ 14 ] 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.

[ 15 ] 王者超 ,李术才 ,乔丽苹 ,等. 三轴剪切作用下体积变化对岩石其他力学性质影响[ J ]. 固体力学 ,2013 ,35( 5 ) :527 – 535.  
( Wang Zhe-chao ,Li Shu-cai ,Qiao Li-ping ,et al. Influence of volume change on other mechanical behaviors of rock subject to triaxial shearing[ J ]. *Chinese Journal of Solid Mechanics* ,2013 35( 5 ) :527 – 535. )