

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.026

复杂节理岩体的剪切强度特性的尺寸影响研究

卢妮妮, 曾亚武, 夏磊

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于三维块体离散元软件 3DEC 程序, 考虑存在三组节理的复杂节理岩体的情况, 通过对 10 个不同尺寸的岩体块体进行直剪试验模拟, 探讨岩体尺寸对于剪切强度特性的影响效果。由于剪切面相对节理面位置的不同, 块体分为两组(第 I、II 组), 得出了法向应力作用下的剪切应力与水平位移的关系曲线图。通过计算可得出剪切强度参数——黏聚力和摩擦角及其与块体尺寸的关系曲线。由此可见, 两组的差异较大, 故在进行选择参数时应根据剪切面的位置分别进行考虑。最后对岩体的剪切强度特性的尺寸效应进行了理论分析, 认为节理岩体的剪切强度特性的尺寸影响的关键原因是节理结构面的存在, 节理的相对位置、组数、间距、材料属性等都是重要的影响因素。

关键词: 节理岩体; 剪切强度参数; 直剪试验; 岩体尺寸

中图分类号: TU459+.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0131-06

Size Effect to Shear Strength of Jointed Rock Masses

LU Nini, ZENG Yawu, XIA Lei

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Shear strength characteristics of rock is one of the indicators of rock mechanical properties, thus the study of size effect has been a subject of particular concern of scholars, so the impact study of the size to jointed rock mass shear strength characteristics emerged. Based on three-dimensional block discrete element software program 3DEC, considering the case of the presence of three sets joints of jointed rock mass, through direct shear test simulation of rock blocks of different sizes, explore the effect of dimension to shear strength characteristics. Due to the different positions of the shear plane, blocks are divided into two groups (Group I、II), a graph of shear stress and horizontal displacement under the action of normal stress was acquired. It can be derived by calculating the shear strength parameters — cohesion and friction angle, and the curves with the rock size. It shows large differences between the two groups, therefore, it should be considered separately when selecting these parameters, and theoretically analyze rock size effect to shear strength propriety. The key reasons for shear strength of jointed rock mass affected by size is the presence of joint structural planes, besides the relative position of joints, the number of joint groups, spacing, material properties etc. are all important influence factors.

Keywords: jointed rock; shear strength parameters; direct shear test; rock size

岩体是一种非连续、各向异性、非均质的地质体^[1], 被结构面分割成大小不一、形态各异的岩块。岩体力学的理论研究、工程评估设计等都是依托于节理岩体的力学参数, 因此, 把握节理岩体的力学性质具有理论和实践的双重意义。而抗剪强度是岩体重要的力学性能指标之一, 所以确定岩体的抗剪强

度特性是至关重要的。

尺寸效应研究一直是学者们关注的课题。表征单元尺寸 REV 的概念最早由 Bear J^[2] 在研究多孔介质渗流时提出, 之后被 Long J C S 等^[3] 和 Oda M^[4] 引入到裂隙岩体这一研究领域。目前, 对于尺寸效应的研究方法分为试验法^[5]、解析法^[6-9] 和数值模拟

收稿日期: 2016-07-24

修稿日期: 2016-08-21

作者简介: 卢妮妮(1991—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为岩体力学与数值模拟。E-mail: echo_95@foxmail.com

通讯作者: 曾亚武(1964—), 男, 湖北安陆人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石工程及岩石破坏机理、岩石力学等方面的研究及教学工作。E-mail: zengyw@whu.edu.cn

法。试验法受到试样尺寸以及实验设备等多方面的限制,又因成本昂贵、取样困难而难以开展。解析法是通过建立岩体等效参数与结构面参数和岩石块体参数之间的明确关系,进而确定岩体等效参数的方法^[10]。

随着近年来计算机水平的不断提高,数值模拟方法越来越受到青睐。Kulatilake P H S W^[11]关于裂隙岩体的岩体变形参数(等效弹性模量和泊松比)的尺寸效应的研究起到了先导性作用。朱万成、向文飞等^[12-15]采用有限元法对裂隙岩体力学参数尺寸效应进行研究。然而采用有限元法对于岩体这种非连续介质进行研究难免具有局限性。因此,Min K B 等^[16-17]应用离散元方法(UDEC)在二维尺度上进行了岩体力学参数尺寸效应研究。闫东旭等^[18]、宁宇等^[19]基于 3DEC 对柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应进行了研究。马超峰等^[20]探讨了围压对表征单元体尺寸的影响。另外,卢波等^[21]应用分形几何的观点进行表征单元体的研究。

目前对尺寸效应的研究多是对单向抗压变形特性和强度特性进行的尺寸效应研究,而对剪切强度特性的尺寸效应研究却鲜有涉及。

本文在前人研究的基础上,应用三维离散元软件 3DEC,考虑三组贯通节理,且三组节理材料属性有所差异的复杂节理状态的情况下,考虑剪切面和节理面不重合的情况,进行直剪试验模拟,研究立方体岩体试样的剪切强度特性是否具有尺寸效应,得出剪切强度参数——黏聚力和内摩擦系数与岩体尺寸的关系式。

1 节理岩体数值模型建立

1.1 几何模型建立

岩体试样采用立方体形状,岩体试样的尺寸选取 1 m ~ 10 m,10 个立方体岩体试样(见图 1),包含三组贯通节理,随着岩体尺寸不断扩大,节理数量也不断增多。应用 3DEC,即可建立节理岩体数值模型。Poly brick 命令形成不同大小尺寸的立方体块体,Jset 命令分割块体形成节理,Gen quad 命令将块体离散化,形成可变形块体。

节理产状如表 1 所示。

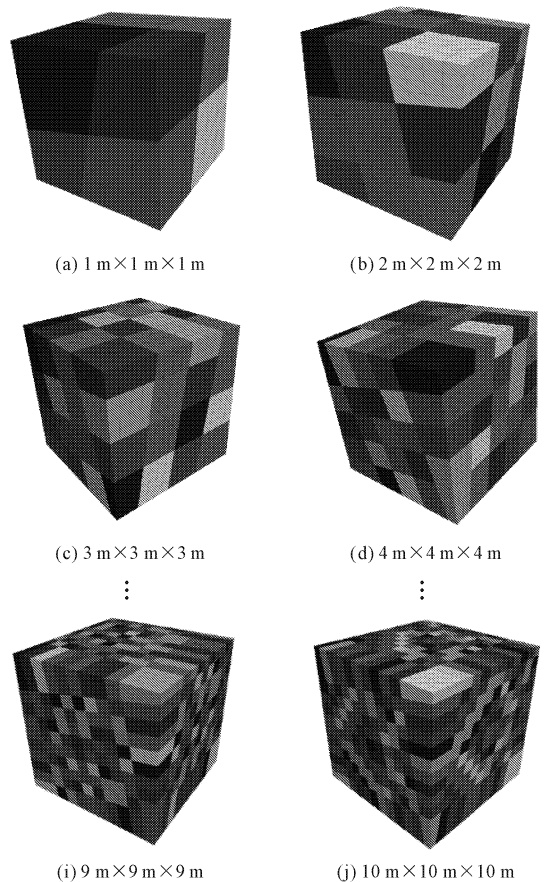


图 1 不同尺寸岩体 3DEC 数值计算模型示意图

表 1 岩体节理几何产状表

节理组号	倾角 / $(^\circ)$	走向线 / $(^\circ)$	节理平均间距 d/m
1	10	270	0.75 ~ 0.82
2	110/75	270	0.75 ~ 0.82
3	80	180	0.75 ~ 0.82

从表 1 可以看出,该组岩体试样的大小尺寸不同,但是节理的倾角、走向、间距等几何信息是基本一致的,可以认为在几何层面上,该组岩体试样的差异在于尺寸方面。

1.2 岩块和结构面本构模型及其力学参数选取

该组数值模型中岩块采用莫尔-库仑弹塑性本构模型,结构面采用理想弹塑性的库仑滑动模型。详细的物理力学参数见表 2、表 3。

岩体的 3 组优势结构面,其产状和材料属性等特征各不相同。

表 2 岩块物理力学参数值

材料号	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 / kPa
1	2500	25	12	2	44	20

表 3 节理物理力学参数值

材料号	法向刚度 $K_n/(N \cdot m^{-1})$	切向刚度 $K_s/(N \cdot m^{-1})$	黏聚力 c /MPa	摩擦角 φ /(°)	膨胀角 /(°)	零膨胀对应的剪位移/mm
1	1.0×10^9	1.0×10^9	0.4	20	8	0.8
2	0.60×10^9	0.40×10^9	3.0	10	—	—
3	1.20×10^9	1.20×10^9	5.0	30	10	—

注:对应的节理几何号与材料号相同。

1.3 数值模型的边界条件及加载方式

将对岩体模型进行直剪试验模拟,剪切面在岩体模型的一半高度处,法向应力以 Bound stress 命令施加,同一尺寸的岩体模型分别施加 0.2 MPa, 0.4 MPa 的法向应力以求解岩体的剪切强度参数黏聚力和摩擦角;水平应力以 Bound xvel = 0.0005 的命令施加,恒低速率加载,满足静态加载条件;剪切面以下部分块体以 bound xvel yvel zvel = 0 命令定义为固定边界。从图 2 可以看出,第 I 组(边长 = 1 m、3 m、5 m、7 m、9 m)与第 II 组(1 = 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m)的岩体模型的主要节理面与剪切面的相对位置的不同,从而导致两组岩体模型的力学特性受弱结构面的影响程度有所差异,故认为将岩体模型分成两组进行比较分析较为合理。

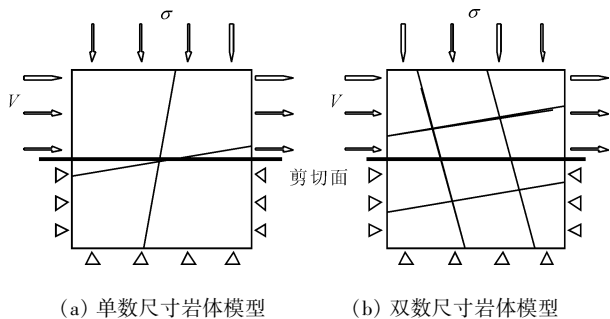


图 2 节理岩体直剪试验 3DEC 数值模型边界条件示意

2 数值模拟结果

2.1 应力应变曲线

每个尺寸的岩体试样分别在法向应力 0.2 MPa, 0.4 MPa 下进行直剪试验,得出剪切强度。试验结果汇总于表 4,剪切应力 - 水平位移曲线如图 3、图 4 所示。

表 4 数值模拟结果汇总表

组号	岩体尺寸/m	法向应力/kPa	剪切强度/kPa
I	1	200	197.217
		400	301.364
	3	200	186.668
		400	282.081
		200	179.710
	5	400	267.084
		200	188.097
	7	400	279.633
		200	224.271
9	400	333.848	
	200	219.357	
II	2	400	356.504
		200	214.425
	4	400	322.923
		200	216.123
	6	400	338.934
		200	219.401
	8	400	363.878
		200	262.489
	10	400	386.252

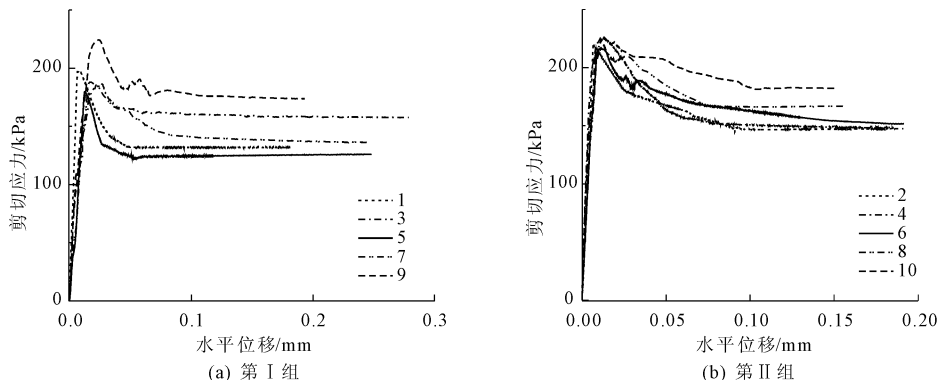


图 3 岩体试样在 0.2 MPa 法向应力下的剪切应力 - 水平位移曲线

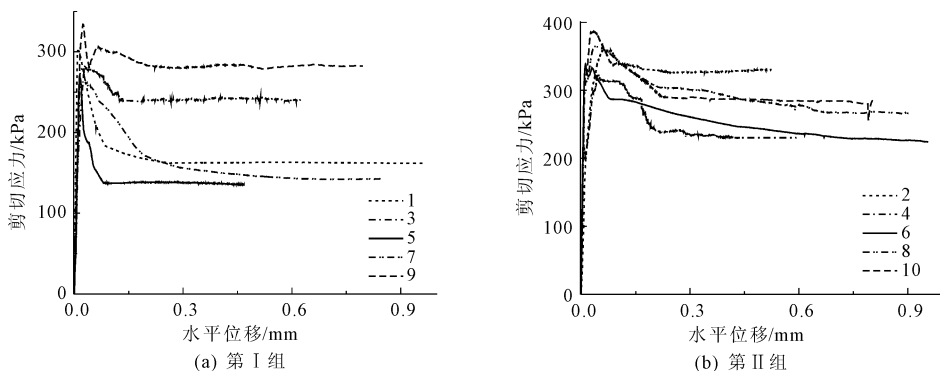


图 4 岩体试样在 0.4 MPa 法向应力下的剪切应力 - 水平位移曲线

2.2 剪切强度与尺寸的关系

根据以上得出的结果,同样的法向应力作用下,剪切强度与尺寸的关系如图 5、图 6 所示。

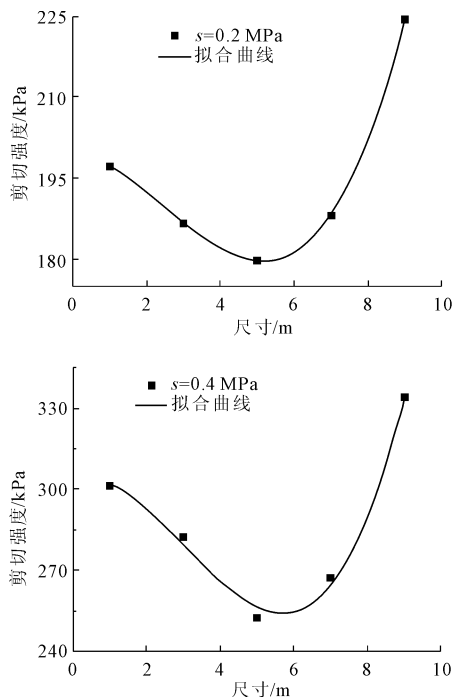


图 5 岩体块体剪切强度与尺寸的关系曲线图(第 I 组)

岩体块体经过不同法向应力作用的直剪试验,得到的剪切强度与尺寸的关系曲线趋势一致,拟合曲线均呈“V”型,第 I 组的岩体在边长尺寸大约为 5 m 时,剪切强度达到最小值;第 II 组的岩体在边长尺

寸大约为 4 m 时,达到最小值。剪切强度受尺寸的影响显著。

2.3 剪切强度参数与尺寸的关系

根据摩尔 - 库仑准则, $\tau = \sigma \cdot \tan\varphi + c$ 线性关系式,由表 4 的每一尺寸岩体在不同法向应力下的剪切强度值,可计算出每一尺寸的岩体的剪切强度指标——黏聚力 c 和摩擦角 φ 。结果见表 5、表 6。

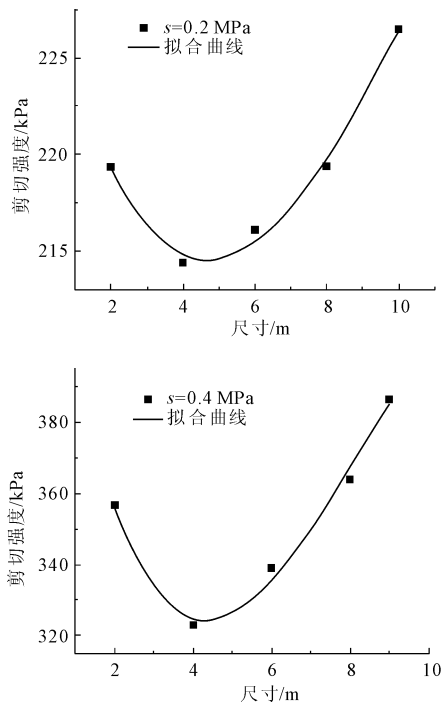


图 6 岩体块体剪切强度与尺寸的关系曲线图(第 II 组)

表 5 剪切强度参数计算结果汇总表(第 I 组)

岩体尺寸/m	黏聚力 c /kPa	[(后项 - 前项)/前项] /%	黏聚力与尺寸关系式	摩擦角 φ /($^{\circ}$)	[(后项 - 前项)/前项] /%	摩擦角与尺寸关系式
1	93.072			27.507		
3	91.255	1.955	$y = 92.0728 + 1.4056x^{6.5044}$ ($R^2 = 0.991$)(幂函数)	25.504	7.282	$y = 28.4066 - 0.6908x - 0.203x^2 + 0.0316x^3$ ($R^2 = 0.979$)(多项式函数)
5	92.338	1.187		25.599	7.471	
7	96.561	4.573		24.593	4.211	
9	114.694	18.779		28.717	16.774	

第 I 组的岩体经过直剪试验,得出的岩体剪切强度参数——黏聚力 c 和摩擦角 φ 关于岩体尺寸大小的关系图见图 7。由图 7 可以看出,岩体尺寸大小确实对剪切强度参数有所影响。而且可以认为岩体的黏聚力具有尺寸效应,随着尺寸的增大,黏聚力也不断增大,在岩体尺寸小于 5 m 时,黏聚力的差别不大,可认为趋于某一定值,即该岩体在边长小于 5 m 后达到稳定状态。摩擦角 φ 与岩体尺寸的关系曲线为“V”型,满足多项式函数关系,在尺寸为 5 m 的时候摩擦角最小。总体而言,摩擦角对尺寸的敏感程度更高。

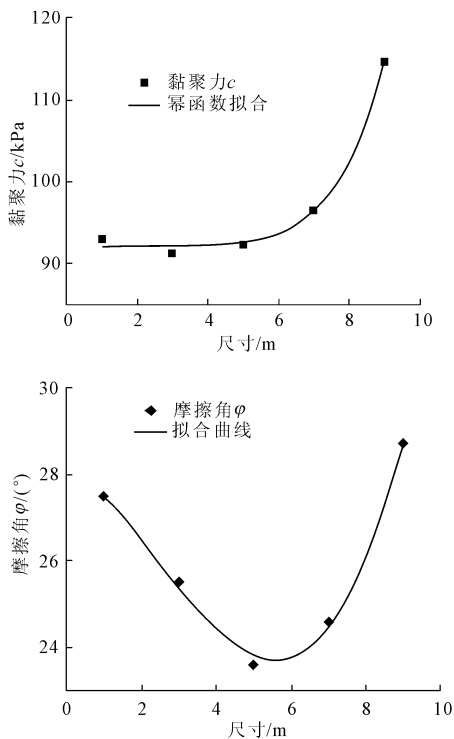


图 7 剪切强度参数与岩体尺寸的关系图(第 I 组)

图 8 是第 II 组的岩体经过直剪试验,得出的岩体剪切强度参数——黏聚力 c 和摩擦角 φ 关于岩体尺寸大小的关系图。黏聚力和摩擦角与岩体尺寸关系曲线为“V”型,满足多项式函数关系,黏聚力和摩擦角与岩体尺寸的关系趋势正好相反,黏聚力在尺寸为 4 m 的时候达到最大,而摩擦角在尺寸为 4 m

的时候达到最小。相比而言,黏聚力对尺寸的敏感程度更高。

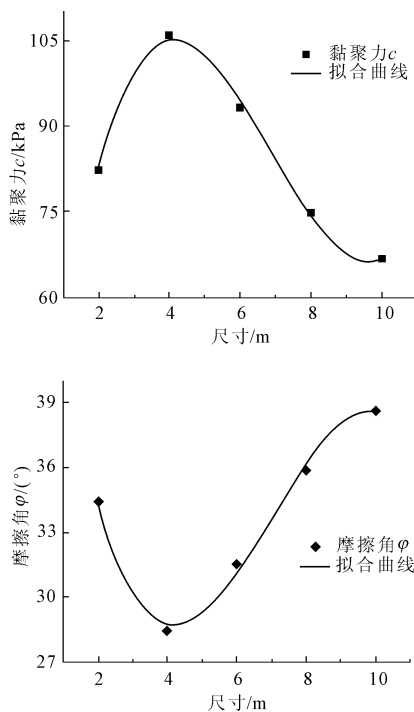


图 8 剪切强度参数与岩体尺寸的关系图(第 II 组)

2.4 岩体剪切强度尺寸影响的理论分析

该组节理岩体,在直剪试验模拟时,立方体块体四周受到力或者位移的约束,一半高度处为剪切面,根据圣维南原理,可以认为,在块体内部存在一定范围内的有效约束区域。所以在块体尺寸很小时,节理数量少,块体相对比较完整,约束的有效范围占块体大小比例较大,因此产生的应力值相对较大。随着尺寸的增大,节理数量增加,岩体结构的完整性趋于破坏,约束的有效范围相对减小,应力值也相应减小,剪切强度值减小。当块体尺寸达到一定尺寸时,节理数量已使得岩体处于破碎岩体状态,因此节理数目的影响可以不予考虑,随着尺寸继续增大,虽然约束的有效范围相对减小,但是相应的,剪切作用的范围变大,所以随着尺寸增大,应力增大,导致剪切强度增大。

表 6 剪切强度参数计算结果汇总表(第 II 组)

岩体尺寸/m	黏聚力 c /kPa	[(后项 - 前项)/前项] /%	黏聚力与尺寸关系式	摩擦角 φ /°	[(后项 - 前项)/前项] /%	摩擦角与尺寸关系式
2	82.210			34.440		
4	91.255	1.955	$y = 3.2788 + 57.563x - 9.9658x^2 + 0.4846x^3$ ($R^2 = 0.987$)(多项式函数)	25.504	7.282	$y = 53.1849 - 13.593x + 2.3119x^2 - 0.110x^3$ ($R^2 = 0.976$)(多项式函数)
6	92.338	1.187		25.599	7.471	
8	96.561	4.573		24.593	4.211	
10	114.694	18.779		28.717	16.774	

另外,第Ⅱ组的剪切面位置比第Ⅰ组更远离剪切面,受弱节理面的影响相应更小,因此对比两组剪切强度值,第Ⅱ组比第Ⅰ组要高。剪切强度参数也因剪切面位置的影响,第Ⅰ组的参数取值受节理材料属性的影响较大,而第Ⅱ组受岩块材料属性(黏聚力较第Ⅰ组小,摩擦角较第Ⅰ组大)的影响较大。因此,第Ⅱ组的剪切强度参数黏聚力和摩擦角关于尺寸的关系趋势相反。

节理岩体的稳定状态取决于结构面的分布规律、空间形态及其力学性质^[22]。岩体剪切强度指标受尺寸影响的根本原因在于岩体内部结构面的存在,结构面的相对位置、组数、数量、间距、材料属性等决定了岩体强度特性,不同尺寸的岩体包含的节理数量不同,导致岩体岩性有所差别。

3 结 论

基于 3DEC 三维离散元软件,对多维度的复杂节理岩体模型进行了直剪试验模拟,研究不同法向应力作用下,剪切强度与岩体块体尺寸的关系,以及剪切强度参数——黏聚力、摩擦角与尺寸的关系。本文的主要研究结论有:

(1) 尺寸对复杂节理岩体的剪切强度特性有所影响,但总体来说,并不具有明显的尺寸效应以及表征单元尺寸。

(2) 同一法向应力作用下,剪切强度与岩体尺寸的关系曲线相似,可拟合为多项式函数曲线。

(3) 剪切强度参数——黏聚力 c 和摩擦角 φ 与岩体尺寸的关系不尽相同。

(4) 岩体内部结构面的存在是导致节理岩体的剪切强度指标受到尺寸影响的根本原因,结构面的相对位置、间距、数量、材料属性等都是影响岩体强度特性的重要因素。剪切面、节理面、岩块之间的相互作用使得岩体强度特性随尺寸而变化。

总之,在确定复杂节理岩体的抗剪强度参数时,要考虑尺寸的影响,且黏聚力和摩擦角的影响效果要分别进行考虑。

参考文献:

[1] 田永生,张盛,李广强.宏观、细观和微观相结合的材料性质研究[J].水利与建筑工程学报,2008,6(1):111-114.

[2] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: American Elsevier, 1972.

[3] Long J C S, Remer J S, Wilson C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. Water Resources Research, 1982, 18(3):645-658.

[4] Oda M. A method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses[J]. Canadian

Geotechnical Journal, 1988, 25(3):440-447.

- [5] 刘顺桂,池永翔,王思敬,等.柱状节理玄武岩体抗剪强度参数尺寸效应研究[J].工程地质学报,2009,17(3):367-370.
- [6] 周创兵,陈益峰,姜清辉.岩体表征单元体与岩体力学参数[J].岩土工程学报,2007,29(8):1135-1142.
- [7] 张贵科.节理岩体正交各向异性等效力学参数与屈服准则研究及其工程应用[D].南京:河海大学,2006.
- [8] 唐辉明,张宜虎,孙云志.岩体等效变形参数研究[J].地球科学,2007,32(3):389-396.
- [9] 杨建平,陈卫忠,戴永浩.裂隙岩体变形模量尺寸效应研究 II:解析法[J].岩土力学,2011,32(6):1607-1612.
- [10] 周创兵,於三大.论岩体表征单元体体积 REV——岩体力学参数取值的一个基本问题[J].工程地质学报,1999,7(4):332-336.
- [11] Kulatilake P H S W. Estimating elastic constants and strength of discontinuous rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(7):847-864.
- [12] 朱万成,张敏思,张洪训,等.节理岩体表征单元体尺寸确定的数值模拟[J].岩土工程学报,2013,35(6):1121-1127.
- [13] 向文飞.裂隙岩体表征单元体及力学特性尺寸效应研究[D].武汉:武汉大学,2005.
- [14] 唐辉明,张宜虎,孙云志.岩体等效变形参数研究[J].地球科学:中国地质大学学报,2007,32(3):389-396.
- [15] 杨建平,陈卫忠,戴永浩.裂隙岩体变形模量尺寸效应研究 I:有限元法[J].岩土力学,2011,32(5):1538-1545.
- [16] Min K B, Jing L. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6):795-816.
- [17] Min K B, Jing L. Stress dependent mechanical properties and bounds of Poisson's ratio for fractured rock masses investigated by a DFN - DEM technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3):1-6.
- [18] 闫东旭,徐卫亚,王伟,等.柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究[J].岩土工程学报,2012,34(2):243-250.
- [19] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等.柱状节理岩体随机模拟及其表征单元体尺度研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1202-1208.
- [20] 马超锋,李 晓,介玉新,等.围压对节理岩体表征单元体尺寸的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3928-3936.
- [21] 卢波,葛修润,朱东林,等.节理岩体表征单元体的分形几何研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1355-1361.
- [22] 王 一然,钟 山,高轩麟,等.基于工程岩体内摩擦系数等效模型数值试验[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):84-87.