

# 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究

闫东旭<sup>1,2</sup>, 徐卫亚<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 石崇<sup>1,2</sup>, 石安池<sup>3</sup>, 吴关叶<sup>3</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 以金沙江白鹤滩水电站工程为背景, 结合相关的岩石力学试验方法, 建立了柱状节理岩体三维离散元模型, 对柱状节理岩体进行了三轴压缩试验数值模拟。数值试验研究了六棱柱形柱状节理岩体柱体直径变化、四棱柱形柱状节理岩体柱体边长、节理错距变化对其等效弹性模量的影响。为研究随机柱状节理岩体柱体尺寸对岩体等效弹性模量的影响, 提出柱体大对角线长尺寸控制方案, 并研究了柱体大对角线长变化对岩体等效弹性模量的影响。通过与现场试验的对比研究, 结果表明: 随机柱体尺寸控制方案可靠; 柱体尺寸的变化对与柱体垂直方向的等效弹性模量影响较大, 是主要影响因素; 四棱柱形柱状节理岩体错距变化主要对与错距平行的岩体等效弹性模量产生影响, 对其它两个方向的等效弹性模量的影响较弱, 是次要影响因素。研究结果为工程实践中等效力学参数的确定提供了相关参考。

**关键词:** 柱状节理; 数值模拟; 等效弹性模量; 尺寸效应

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0243-08

**作者简介:** 闫东旭(1984-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事岩石力学理论与工程实践研究。E-mail: 419462921@qq.com。

## Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass

YAN Dong-xu<sup>1,2</sup>, XU Wei-ya<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, SHI Chong<sup>1,2</sup>, SHI An-chi<sup>3</sup>, WU Guan-ye<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing 210098, China; 3. East China Hydropower Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Based on Baihetan Hydropower Project on Jinsha River, 3D discrete element models for columnar jointed rock mass are established considering the relevant methods of rock mechanics. Numerical simulations of triaxial compression tests on the columnar jointed rock mass are carried out. The impacts of diameter change on the equivalent elastic modulus of hexagonal columnar jointed rock mass as well as those of side length and joint stagger change on the equivalent elastic modulus of quadrangular columnar jointed rock mass are studied. In order to investigate the impacts of size change on the equivalent elastic modulus of random columnar jointed rock mass, a program for controlling columnar size is proposed using the average large diagonal size. Then the impacts of change of the average large diagonal size on the equivalent elastic modulus are studied. It is shown from the researches on size effect and comparison with the in-situ tests that changes in cylinder size have larger impacts on the equivalent elastic modulus perpendicular to cylinder than on that parallel to cylinder. Changes in stagger of quadrangular columnar jointed rock mass mainly have impacts on the equivalent elastic modulus parallel to stagger and have weak impacts on the equivalent elastic moduli in two other directions. The results can provide reference for the determination of mechanical parameters in engineering practice.

**Key words:** columnar joint; numerical simulation; equivalent elastic modulus; size effect

## 0 引言

岩体力学参数是岩石力学与工程实践研究的重点与难点, 参数的取值直接影响研究成果的正确性与精确度, 它在很大程度上决定了数值计算的准确性与适用性。岩体是地质体的一种, 其中包括结构体和结构

面, 结构面的存在使得岩石具有不连续性和不均匀性。因此, 柱状节理岩体中节理的规律性分布使得柱状节理岩体具有了不连续与不均匀的力学特性。小范围的

基金项目: 国家自然科学基金项目(50911130366, 50979030)

收稿日期: 2010-12-27

室内岩块试验以及现场平洞试验的结果难以代表几十米乃至几百米以下的工程岩体的力学性质,更难以代表不同地质单元和不同范围的工程岩体力学性质。为了探究不同几何形状与尺寸的工程岩体的力学特性,总结尺寸与工程岩体相关力学参数之间的关系与规律也是当今岩石工程问题研究的热点与难点。

近年来,在工程材料力学性能尺寸效应方面的研究逐渐增多。张明等<sup>[1]</sup>基于最弱链模型和缺陷的Poisson分布假设,综合体积和材质因素,建立了准脆性材料破坏概率和强度尺寸效应的统计模型和一般表达式。周火明等<sup>[2]</sup>采用室内和现场岩体力学试验和数值模拟等手段,对三峡永久船闸边坡岩体宏观力学参数进行了研究,建立了岩体变形模量与尺寸之间的关系。陈瑜等<sup>[3]</sup>采用大理岩岩石样本,通过单轴压缩试验,对其尺寸效应进行了研究对比,得到了高径比同大理岩体相关力学参数之间的关系。可见,岩石材料的尺寸效应现象一直是岩石工程领域有待解决的问题,它直接关系到岩土工程设计、实验和数值计算时岩体力学参数的选取和预测<sup>[4-7]</sup>。

与计算机数值模拟相比,现场原位试验虽然能够得到比较准确的力学参数,但由于其所需投资巨大,费工费时,因此只有在一些重大的工程中开展。对一般的岩体工程来说,通常是在室内岩块试验的基础上,一般通过经验类比法、折减法来估计现场岩体的力学参数。用经验估计的方法确定岩体的力学参数,由于受试样原状性、代表性和试验方法合理性等因素的影响,因而有一定的局限性。计算机数值模拟试验可以弥补这些缺陷,它具有可控性、无破坏性、安全性、可重复性的特点,可以对不同的方案进行测试和评估,从而节约经费、缩短周期。金沙江白鹤滩水电站坝址区工程地质条件十分复杂,主要表现在电站建基岩体二迭系厚层玄武岩的第三层( $P_2\beta_3$ )微晶隐晶玄武岩柱状节理发育,直接影响拱座和坝基岩体变形和抗滑稳定。节理的存在给为工程设计合理地确定参数增加了难度<sup>[8]</sup>。徐卫亚的柱状节理研究团队<sup>[9-14]</sup>、刘顺桂等<sup>[15]</sup>先后从不同的角度基于金沙江白鹤滩水电站工程实际对柱状节理岩体力学参数取值及尺寸效应对岩体力学参数的影响开展了研究工作,并取得了有益的结论,指出了研究工作进展的方向。

本文以金沙江白鹤滩水电站工程为背景,结合现行的岩石力学试验方法,对柱状节理岩体进行了三轴压缩试验的计算机模拟,研究了柱状节理岩体弹性模量的各向异性以及节理间距、错距等因素对柱状节理岩体弹性模量的影响,以便提出合理的与数值分析相适应的柱状节理岩体等效弹性模量的取值方法。

## 1 白鹤滩坝址区柱状节理岩体结构特征

柱状节理是玄武岩中常见的一种原生破裂构造,多见于厚层熔岩中,它往往将岩体切割成一种规则的多边形长柱体,柱体基本垂直于熔岩层的延伸方向。在这些柱体尚未完全凝固硬化时,如果继续向前流动,将促使柱体一定部位发生倾斜,而此倾斜即反映了熔岩的流动方向。在白鹤滩坝址区的玄武岩层中,柱状节理的发育是不均匀的,主要发育在 $P_2\beta_2^2$ ,  $P_2\beta_3^1$ ,  $P_2\beta_3^2$ ,  $P_2\beta_3^3$ ,  $P_2\beta_4^1$ ,  $P_2\beta_6^1$ ,  $P_2\beta_7^1$ ,  $P_2\beta_8^2$ 等8个亚层内。柱体断面主要以五边形及不规则四边形为主,柱体长度一般1~3 m,部分柱体较长,达5 m。柱状节理面宽度一般13~25 cm,部分柱体柱面较宽,达50~120 cm。柱面大多起伏,较粗糙,部分柱体柱面不完整,柱体扭曲。由于两岸坝肩柱体节理裂隙较为发育,自然降水多沿裂隙渗出,柱体基本呈干燥状态。

从以上柱状节理发育的特征看,可以将柱状节理分为3类:①柱状节理发育的密度较大,柱体细长,长度一般2~3 m,直径13~25 cm,岩石呈灰黑色,其内微裂隙发育,切割岩体块度为5 cm左右,主要分布在 $P_2\beta_3^{3-1}$ ,  $P_2\beta_3^{3-2}$ ,  $P_2\beta_3^{3-3}$ ;②柱状节理发育不规则,未切割成完整的柱体,柱体长度一般在0.5~2.0 m,直径25~40 cm,其内微裂隙较发育,但相互咬合,未完全切断,块度在10 cm左右。分布在 $P_2\beta_3^2$ ,  $P_2\beta_6^1$ ,  $P_2\beta_7^1$ ,  $P_2\beta_8^2$ 层;③柱状节理发育不规则,柱体粗大,直径0.5~2.5 m,长度1.5~5 m不等,切割不完全,嵌合紧密。分布在 $P_2\beta_2^2$ ,  $P_2\beta_3^3$ ,  $P_2\beta_4^1$ 层。白鹤滩坝址区三类柱状节理岩体形貌如图1所示。

## 2 三轴压缩试验原理与随机模型生成方法

### 2.1 三轴压缩试验原理与方法



(a) ①类柱状节理岩体



(b) ②类柱状节理岩体



(c) ③类柱状节理岩体

图1 白鹤滩坝址区柱状节理岩体

Fig. 1 Columnar jointed rock mass at Baihetan dam site

岩体的现场三轴压缩试验是岩石工程, 尤其是大型水电工程的重要试验项目, 在参数取值的过程中起着决策性作用。但是受到取样、经费、设备等诸多因素的制约, 三轴压缩试验的规模和尺度不能过大, 很难对现场岩体的真实力学性质做出精确的研究。三轴压缩试验计算机数值模拟<sup>[16]</sup>在试样尺寸选择、荷载施加、地质信息采用上方便灵活, 易于操作控制, 其试验结果也可以为工程实践参数取值提供依据。由于柱状节理岩体有着显著的各向异性特性, 试验时采用与节理平行和垂直两种不同的加载方向。由于试验分别采用不同的加载方向, 确定某一特定加载方向后, 可将岩体某一特定方向上的等效力学特性从岩体的各向异性特性中分离出来。由于试验加载压力相对较小, 可认为岩体变形处在弹性变形范围内。通过对不同尺寸岩体试样进行三轴压缩试验的数值模拟, 可以多尺度地认识柱状节理岩体的力学性质。

由弹性力学胡克定律可知:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)], \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)], \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

选取一立方体, 实施如下的应力路径  $(0, 0, 0) \rightarrow (\sigma_3, \sigma_3, \sigma_3) \rightarrow (\sigma_1, \sigma_3, \sigma_3)$ , 其中  $(\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq 0)$ , 试验加载路径如图2所示。

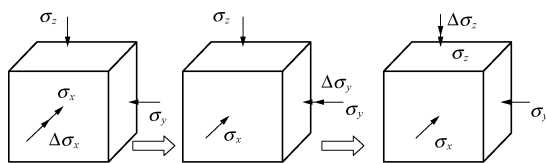


图2 三轴压缩模拟试验加载路径

Fig. 2 Loading paths of triaxial compression simulation test

对于第1步, 施加  $\sigma_3$  的围压, 应力应变关系为

$$\varepsilon_1^1 = \varepsilon_2^1 = \varepsilon_3^1 = \frac{1-2\nu}{E} \sigma_3 \quad (2)$$

对于第2步, 在第1步基础上施加单向荷载, 可得

$$\varepsilon_1^2 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - 2\nu\sigma_3) \quad (3)$$

式(3)与式(2)相减后可得

$$E = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1i}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4)$$

式(4)就是三轴压缩试验计算弹性模量的基本方程, 三轴压缩试验可按如下步骤进行:

(1) 采用立方体作为试件, 选取一个方向作为试件的轴压方向, 其余两个方向作为围压方向。由于柱状节理岩体具有各向异性的特征, 故在进行试验时考

虑将围压方向与轴压方向调换以作相应的对比。

(2) 确定轴压方向后, 对试件轴压和围压方向施加大小相等的压力, 记录轴压方向各测点的应变初值。

(3) 保持试件的围压不变, 分级继续施加轴向压力, 记录轴压方向各测点的应变值。

(4) 计算各级轴压与围压的应力差和轴压方向各个测点相对于应变初值的应变增量, 取各测点的应变增量平均值, 绘制应力差与应变增量的关系曲线, 根据该曲线计算弹性模量。

## 2.2 随机柱体生成及尺寸控制方法

白鹤滩柱状节理岩体柱体断面主要以不规则五边形及四边形为主, 如图3所示。为有效模拟柱体断面, 采用Voronoi图法对其进行结构网络模拟<sup>[17]</sup>。Voronoi图是一个关于空间划分的基础数据结构。100 a来, 它被应用在与几何信息相关的各个领域。随着计算机技术的普及和发展, Voronoi图的应用范围也在不断扩大, 在物理化学、机械设计、数学规划、地质统计、移动通信等诸多领域都能体现出Voronoi图应用的优越性<sup>[18-21]</sup>。随机柱状节理岩体的柱体截面划分, 同样可以采用Voronoi图法进行。采用Voronoi图法对柱状节理岩体截面裂隙网络进行模拟, 有效解决了随机裂隙模拟的困难。在柱状节理力学特性的研究上, 郑文荣<sup>[13]</sup>和宁宇等<sup>[14]</sup>采用Voronoi图法进行了相关的研究工作, 合理解释了刚性承压板试验尺寸效应引起的试验成果各向异性原因, 确定了仅考虑柱体原生裂隙的REV尺度为  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。

Voronoi图的数学原理可以做如下描述: 假设  $p_1$  和  $p_2$  是平面上的两点,  $L$  将平面分成  $L_L$  和  $L_R$  两部分, 位于  $L_L$  内的点  $p_i$  具有特征:  $d(p_1, p_i) < d(p_1, p_2)$ , 其中  $d(p_1, p_i)$  表示  $p_1$  与  $p_i$  之间的欧几里得距离,  $i=1, 2$ 。这意味着, 位于  $L_L$  内的点比平面其他点更接近  $p_1$ , 换句话说,  $L_L$  是比平面其他点更接近  $p_1$  的点的集合, 记为  $V(p_1)$ , 如图4所示。如果用  $H(p_1, p_2)$  表示半平面  $L_L$ , 而  $L_R = H(p_2, p_1)$ , 则有  $V(p_1) = H(p_1, p_2)$ ,  $V(p_2) = H(p_2, p_1)$ 。

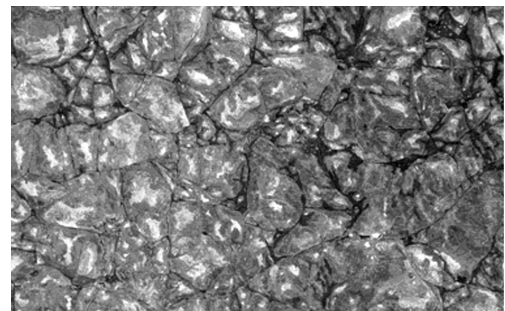


图3 白鹤滩坝址区柱状节理岩体断面

Fig. 3 Section of columnar jointed rock mass at Baihetan dam site

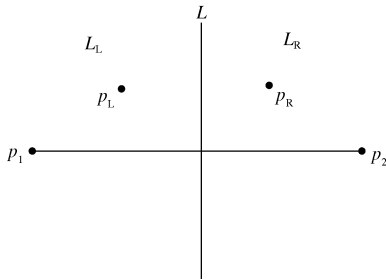


图 4  $V(p_1)$ 和 $V(p_2)$ 示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Sketch of  $V(p_1)$  and  $V(p_2)$

本文采用增量构造方法生成Voronoi图，具体生成方法见周培德的研究<sup>[17]</sup>。为了有效控制生成的柱状节理岩体的尺寸，提出柱状节理岩体截面平均大对角线长尺寸控制方案，即用试块中所包含柱体截面的最大对角线长度的算术平均值作为柱状节理岩体尺度评价的依据。

计算机程序实现的方法如下：①将生成的柱状节理岩体截面的边与点的信息写成dxf格式，以AutoCAD为输出界面，绘制出平面Voronoi图；②统计柱体截面的最大对角线长并计算其平均值；③计算目标最大对角线长与生成柱体截面最大对角线长平均值的比值关系，并以此作为截面图几何尺寸缩放的依据；④按目标比例缩放生成的Voronoi图，生成依平均大对角线长控制尺寸的柱状节理岩体截面。

3 三轴压缩试验数值模拟

3.1 试件模型及参数选取

针对白鹤滩水电站坝址区的地质特性，为了研究节理间距和错距对柱状节理岩体等效弹性模量的影响，选取四棱柱形柱状节理岩体和六棱柱形柱状节理岩体作为研究对象。为充分体现包含地质与几何信息，减少试件尺寸选取对试验结果的影响，依照文献[22, 23]中分析裂隙节理岩体的数值方法，采用3DEC建立三维离散元模型<sup>[12-14]</sup>，采用3DEC命令随机生成平均间距为50 cm的层内错动带，选取并固定试件尺寸为3 m×3 m×3 m进行试验。试验采用x轴和z轴作为围压方向（水平方向），y轴作为轴压方向（铅直方向）。试验模型示意如图5所示。

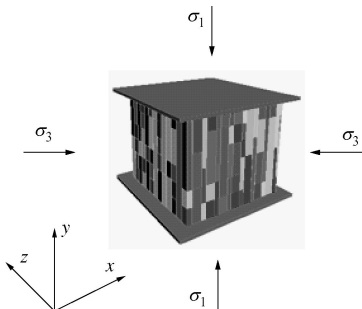
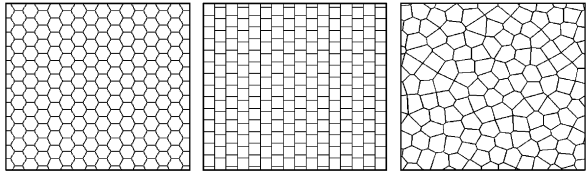


图 5 三轴压缩试验数值模型

Fig. 5 Numerical model of triaxial compression tests

白鹤滩坝址区柱状节理岩体主要为二迭系厚层玄武岩的第三层（ $P_2\beta_3$ ）微晶隐晶玄武岩柱状节理，柱体直径多为10~40 cm<sup>[24]</sup>，故采用10~50 cm 5种不同直径（或边长）的六边形（或四边形）作为研究对比的依据，柱状节理岩体试块截面如图6所示。完整岩石参数：重度=2.7 kg/m<sup>3</sup>，弹性模量 $p_i=60$  GPa，泊松比 $\nu_i=0.2$ ，黏聚力 $c_i=12.4$  MPa，摩擦角 $\phi_i=56.15^\circ$ ；结构面参数： $K_n=100$  GPa/m， $K_s=50$  GPa/m， $c=0.6$  MPa， $\phi=36^\circ$ ， $\sigma_l=0$  MPa<sup>[25]</sup>。文献[8, 13, 25]对柱状节理岩体等效弹性模量相关研究成果见表1。



(a) 六边形 (b) 四边形 (c) 随机形

图 6 柱状节理岩体试块截面图

Fig. 6 Section of a columnar jointed specimen

表 1 监测资料研究成果

Table 1 Research results of monitoring data

柱体尺寸/cm	$E_x$ /MPa	$E_z$ /MPa	$E_y$ /MPa
20	10.94	10.34	37.19
30	13.24	13.22	41.05

分别选取10 cm尺寸级3种柱状节理岩体的x方向进行全应力应变三轴压缩试验，围压设定为2 MPa。由图7中试验曲线可知，轴压在10 MPa之内时柱状节理岩体尚未进入塑性破坏过程，应力应变关系处于线弹性阶段。为研究柱状节理岩体的等效弹性模量，三轴压缩试验的数值模拟按下列步骤进行：对于岩体结构的3个方向，选取一个方向作为轴压方向，其余两个方向作为围压方向，首先采用2 MPa围压，轴压按照2, 4, 6, 8, 10 MPa五级加载。根据这一加载路径进行数值模拟试验，求得各级加载所对应的应力和应变。由式（4）即可得到岩体的弹性模量。

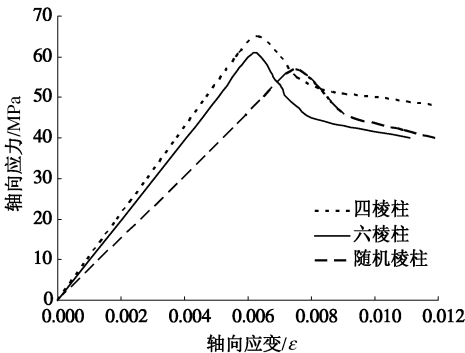


图 7 三轴压缩曲线图

Fig. 7 Triaxial compression curves

3.2 试验方案设计

为了研究柱状节理岩体的各向异性力学特性，分别从3个不同的方向施加轴向压力，以得到3个不同方向的弹性模量。为研究其3个方向弹性模量与节理

间距之间的关系,六棱柱采用 10, 20, 30, 40, 50 cm 等 5 种不同的直径进行对比研究,四棱柱采用无错距的 10, 20, 30, 40, 50 cm 等 5 种不同的边长进行对比研究,随机节理岩体采用 10, 20, 30, 40, 50 cm 等 5 种不同平均大对角线长进行对比研究。为了研究四棱柱节理错距对弹性模量的影响,选取 50 cm 边长四棱柱为例,错距选取节理边长的 10%, 20%, 30%, 40%, 50%进行对比研究。见表 2~5。

表 2 六棱柱节理间距影响数值试验方案

Table 2 Numerical test schemes for researches on impacts of joint spacing of hexagonal prism			
方案	柱体直径/cm	加载路径	
		围压值/MPa	轴压值/MPa
1	10	2	2
2	20	2	4
3	30	2	6
4	40	2	8
5	50	2	10

表 3 四棱柱节理间距影响数值试验方案

Table 3 Numerical test schemes for researches on impacts of joint spacing of quadrangular prism			
方案	柱体边长/cm	加载路径	
		围压值/MPa	轴压值/MPa
1	10	2	2
2	20	2	4
3	30	2	6
4	40	2	8
5	50	2	10

表 4 四棱柱节理错距影响数值试验方案

Table 4 Numerical test schemes for researches on impacts of staggered distance of quadrangular prism			
方案	节理错距比/%	加载路径	
		围压值/MPa	轴压值/MPa
1	10	2	2
2	20	2	4
3	30	2	6
4	40	2	8
5	50	2	10

表 5 随机节理平均大对角线长影响数值试验方案

Table 5 Numerical test schemes for researches on impacts of average large diagonal length of random joint			
方案	平均大对角线长/cm	加载路径	
		围压值/MPa	轴压值/MPa
1	10	2	2
2	20	2	4
3	30	2	6
4	40	2	8
5	50	2	10

4 结果分析

按照上述试验方法,岩块和节理力学参数赋予确定值后,分别从 3 个方向进行三轴压缩数值试验,由应力变化量与应变变化量相比得到两种柱状节理岩体 3 个不同方向的弹性模量。由图 8~11 试验结果表明:柱状节理岩体具有明显的各向异性力学特性,垂直柱

轴方向弹性模量明显小于平行柱轴方向弹性模量,而垂直柱轴两个方向的弹性模量基本相同。

4.1 六棱柱直径对岩体等效弹性模量影响

由图 8 可知,随柱体直径的增加六棱柱形柱状节理岩体的等效弹性模量呈显著增加趋势。其中垂直于柱轴方向弹性模量约由 10 GPa 增至 26 GPa,平行于柱轴方向弹性模量从 38.64 GPa 增至 46.85 GPa,垂直于柱轴方向的弹性模量增量大于平行于柱轴方向增量,表明柱体直径变化对柱状节理岩体的轴向弹性模量影响较小,对垂直柱轴方向的弹性模量影响较大。

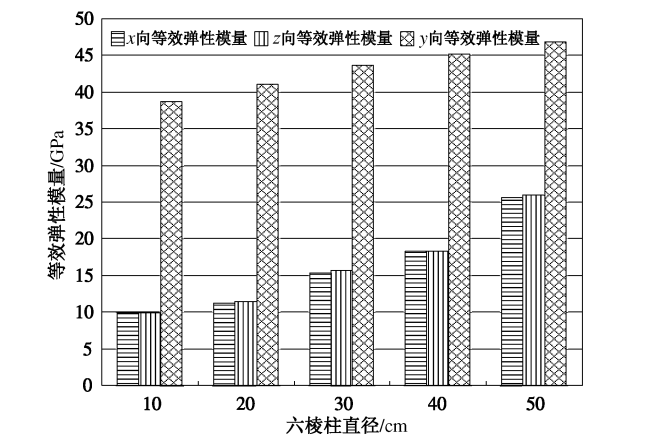


图 8 六棱柱直径对等效弹性模量影响  
Fig. 8 Effect of diameter of hexagonal prism on equivalent elastic modulus

4.2 四棱柱边长对岩体等效弹性模量的影响

由图 9 可知,随着四棱柱截面边长的增加,柱状节理岩体的等效弹性模量显著增加。其中垂直于柱轴方向的等效弹性模量由约 11 GPa 增至 29 GPa,平行于柱轴方向弹性模量由 40.32 GPa 增至 50.49 GPa。与六棱柱形柱状节理岩体类似,垂直于柱轴方向的弹性模量增量大于平行于柱轴方向增量,表明柱体边长变化对柱状节理岩体的轴向弹性模量影响较小,对垂直柱轴方向的弹性模量影响较大。

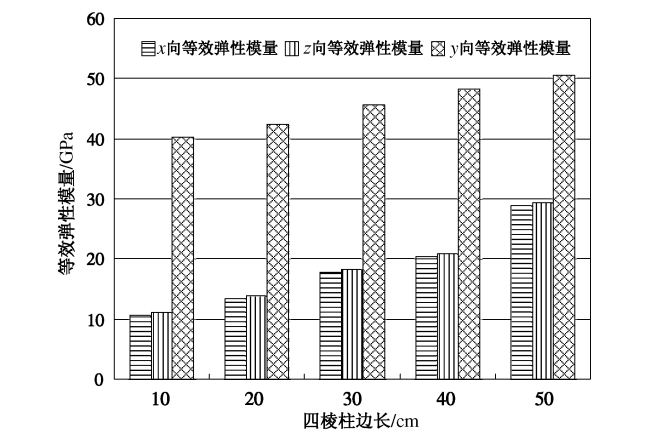


图 9 四棱柱边长对等效弹性模量影响  
Fig. 9 Effect of side length of quadrangular prism on equivalent elastic modulus

4.3 四棱柱节理错距比对岩体弹性模量影响

数值试验选取边长为 50 cm 的四棱柱形柱状节理岩体，研究错距比对等效弹性模量影响。试验所得结果如图 10 所示。

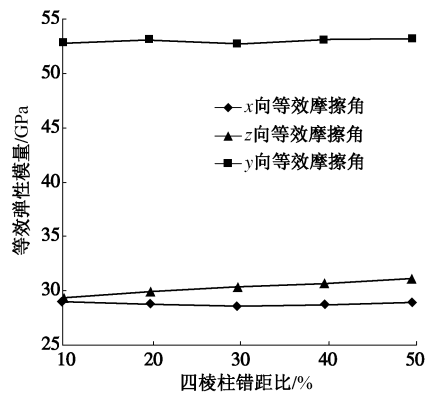


图 10 错距比对等效弹性模量影响

Fig. 10 Effect of staggered distance ratio on equivalent elastic modulus

垂直于柱轴  $x$  方向等效弹性模量在 28.66 GPa 和 29.06 GPa 间波动，平行于柱轴  $y$  方向等效弹性模量在 52.77 GPa 和 53.26 GPa 间波动，平行于错距  $z$  方向等效弹性模量呈递增趋势，等效弹性模量由 29.33 GPa 增加到 32.12 GPa，说明节理错距对平行错距方向的等效弹性模量影响较大，对其余两个方向影响较小或无影响。

4.4 随机柱体平均大对角线长对岩体等效弹性模量的影响

由图 11 可知，随柱体平均大对角线长的增加随机柱状节理岩体的等效弹性模量呈显著增加趋势。其中垂直于柱轴方向弹性模量约由 8 GPa 增至 20 GPa，平行于柱轴方向弹性模量从 34.25 GPa 增至 43.87 GPa，垂直于柱轴方向的弹性模量增量大于平行于柱轴方向增量，表明柱体直径变化对柱状节理岩体的轴向弹性模量影响较小，对垂直柱轴方向的弹性模量影响较大。

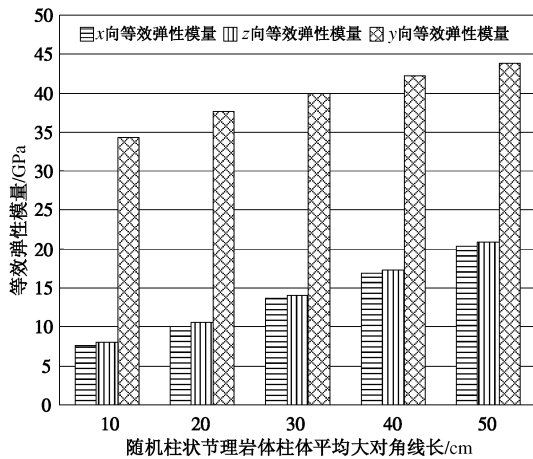


图 11 平均大对角线长对等效弹性模量影响

Fig. 11 Effect of average large diagonal length on equivalent elastic modulus

4.5 研究结果与既有结果对比分析

本研究方法获得的部分结果与  $P_2\beta_3^{3-2}$  层 PD36 处原位试验及其数值研究成果作对比分析见表 6。

表 6 研究成果数据对比分析

Table 6 Comparison and analysis of test data				
结果类别	柱体尺寸/cm	$E_x$ /MPa	$E_z$ /MPa	$E_y$ /MPa
现场研究结果 <sup>[8, 13, 25]</sup>	20	10.94	10.34	37.19
	30	13.24	13.22	41.05
随机柱	20	10.06	10.56	37.69
	30	13.67	14.13	39.92
六棱柱	20	11.22	11.47	41.03
	30	15.38	15.72	43.68
四棱柱	20	13.45	13.90	42.34
	30	17.82	18.21	45.67

由现有研究成果与数值计算结果对比发现，随机形柱状节理岩体模型用于确定白鹤滩坝址区柱状节理岩体等效弹性参数较为准确，六棱柱其次，四棱柱误差最大。该结果与坝址区柱状节理岩体地质、几何形态表现一致，也证明了 Voronoi 图法构建的模型能够较好反映白鹤滩坝址区柱状节理岩体的几何特性，研究结果可靠。

5 结 论

以金沙江白鹤滩水电站工程为背景，对柱状节理岩体进行了三轴压缩试验数值模拟，研究了四棱柱柱体边长和节理错距，六棱柱柱体直径以及随机柱状节理岩体平均大对角线长对相应形状的柱状节理岩体等效弹性模量的影响。结果表明：

(1) 柱状节理岩体的垂直于柱轴方向等效弹性模量明显小于平行柱轴方向等效弹性模量，柱状节理岩体各向异性力学性质明显。由于  $x$  向、 $z$  向等效弹性模量较为接近，可将规则棱柱柱状节理岩体简化为横观各向同性处理。

(2) 对比分析四棱柱形柱状节理岩体、六棱柱形柱状节理岩体和随机柱状节理岩体试验结果可知，在柱体尺寸相同的情况下，四棱柱形柱状节理岩体等效弹性模量比六棱柱形偏高，六棱柱形柱状节理岩体等效弹性模量比随机柱状节理岩体偏高。该结果说明柱体截面排列规则程度越高，岩体等效弹性模量相对越高，随机节理岩体不规则裂隙较多，裂隙间的错动程度较高，增大了岩体的变形量，导致岩体整体等效弹性模量值偏低。

(3) 四棱柱柱状节理岩体错距主要对与其平行的岩体等效弹性模量产生影响，与柱体边长相比，边长变化对岩体等效弹性模量的影响较强，为主要影响因素；错距变化对等效弹性模量的影响较弱，为次要影响因素。

(4) 无论是四棱柱形柱状节理岩体、六棱柱形柱状节理岩体还是随机柱状节理岩体, 柱体尺寸的变化对与柱体垂直方向的等效弹性模量影响较大, 四棱柱形柱状节理岩体错距变化主要对与错距平行的岩体等效弹性模量产生影响, 错距变化对其它两个方向的等效弹性模量影响较弱。

(5) Singh<sup>[26]</sup>推导出横观各向同性四棱柱形柱状节理岩体等效弹性模量计算公式, 其计算结果比数值试验结果约高出 15%; 由随机模型模拟得到的结果与现有研究资料对比可以看出本文采用的模拟分析方法所得结果与现场研究成果较为接近, 数值模拟结果可靠, 可作为相关工程问题的参考依据。

(6) 本文未涉及层内错动带对柱状节理岩体的力学性质的影响, 该问题可作为今后研究工作进展的方向。

#### 参考文献:

- [1] 张 明, 卢裕杰, 杨 强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1782 - 1789. (ZHANG Ming, LU Yu-jie, YANG Qiang. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1782 - 1789. (in Chinese))
- [2] 周火明, 盛 谦, 邬爱清. 三峡工程永久船闸边坡岩体宏观力学参数的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(5): 661 - 664. (ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, WU Ai-qing. Size effect analysis of macro-mechanics parameters for the rock masses of the TGP ship lock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(5): 661 - 664. (in Chinese))
- [3] 陈 瑜, 黄永恒, 曹 平, 等. 不同高径比时软岩强度与变形尺寸效应研究[J]. 中南大学学报, 2010, **41**(3): 1073 - 1078. (CHEN Yu, HUANG Yong-heng, CAO Ping, et al. Size effect experimental study of strength and deformation in different height-to-diameter ratio soft rocks[J]. Journal of Central South University, 2010, **41**(3): 1073 - 1078. (in Chinese))
- [4] 洪 亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 526 - 533. (HONG Liang, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 526 - 533. (in Chinese))
- [5] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, **22**(4): 112 - 118. (YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(4): 112 - 118. (in Chinese))
- [6] 徐 磊, 任青文. 分形节理抗剪强度尺寸效应的数值试验[J]. 采矿安全与工程学报, 2007, **24**(4): 405 - 408. (XU Lei, REN Qing-wen. Numerical test for size effect of shear strength of fractal joints[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, **24**(4): 405 - 408. (in Chinese))
- [7] 梁正召, 唐春安, 唐世斌, 等. 岩石紧凑拉伸断裂过程及其尺寸效应的三维数值模拟[J]. 计算力学学报, 2007, **24**(3): 334 - 340. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, TANG Shi-bin, et al. Numerical study on three dimensional compact tension fracture of single notched rocks and associated scale effects by parallel computing[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, **24**(3): 334 - 340. (in Chinese))
- [8] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩工程地质研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2006. (East China Investigation and Design Institute of CHECC. Engineering geology's research report of columnar jointed basalt at Baihetan Hydropower Station on Jinsha River[R]. Hangzhou: East China Investigation and Design Institute of CHECC, 2006. (in Chinese))
- [9] 徐卫亚, 郑文棠, 宁 宇, 等. 柱状节理坝基岩体三维各向异性数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 949 - 955. (XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, NING Yu, et al. 3D anisotropic numerical analysis of rock mass with columnar joints for dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 949 - 955. (in Chinese))
- [10] 郑文棠, 徐卫亚, 邬爱清, 等. 柱状节理开挖模拟洞数值原位试验[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊 1): 253 - 257. (ZHENG Wen-tang, XU Wei-ya, WU Ai-qing, et al. Numerical in situ testing of excavation experimental cavity on columnar joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 253 - 257. (in Chinese))
- [11] 宁 宇, 徐卫亚, 郑文棠, 等. 白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1890 - 1898. (NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, et al. Reinforcement effect analysis and global safety evaluation of arch dam and abutment of Baihetan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1890 - 1898. (in Chinese))

- [12] 孟国涛. 柱状节理岩体各向异性力学分析及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2007. (MENG Guo-tao. Geomechanical analysis of anisotropic columnar jointed rock mass and its application in hydropower engineering[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [13] 郑文棠. 不规则柱状节理岩石力学及在高边坡坝基岩石工程中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZHENG Wen-tang. Rock mechanics of irregular columnar jointed basaltic mass and its application in high slope and dam foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [14] 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. (NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, et al. Study of random simulation of columnar jointed rock mass and its representative elementary volume scale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1202 - 1208. (in Chinese))
- [15] 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. (LIU Shun-gui, CHI Yong-xiang, WANG Si-jing, et al. Size effect on shear strength of basalt rock mass with columnar joints[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(3): 367 - 370. (in Chinese))
- [16] 赵海斌. 层状岩体力学参数试验及数值仿真研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (ZHAO Hai-bin. Test and numerical simulation study on mechanical parameters of layered rock mass[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [17] 周培德. 计算几何—算法设计与分析[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2005. (ZHOU Pei-de. Calculating geometry—design and analysis of arithmetic[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [18] 谢顺平, 王结臣, 冯学智, 等. 基于节点逼近提取的平面点集 Voronoi 图构建方法[J]. 测绘学报, 2007, **36**(4): 436 - 442. (XIE Shun-ping, WANG Jie-chen, FENG Xue-zhi, et al. Algorithm for constructing voronoi diagram of planar points based on approximating and extracting vertices[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, **36**(4): 436 - 442. (in Chinese))
- [19] HELD M. VRONI: an engineering approach to the reliable and efficient computation of voronoi diagrams of points and line segments[J]. Computational Geometry, 2001, **18**(1): 95 - 123.
- [20] 傅廷亮, 尹雪涛, 张 扬. Voronoi 算法模型及其程序实现[J]. 计算机仿真, 2006, **23**(10): 89 - 92. (FU Ting-liang, YIN Xue-tao, ZHANG Yang. Voronoi algorithm model and the realization of its program[J]. Computer Simulation, 2006, **23**(10): 89 - 92. (in Chinese))
- [21] ALBERS G, et al. Voronoi diagrams of moving points[J]. International Journal of Computational Geometry and Applications, 1998, **8**(3): 365 - 380.
- [22] 白永健, 黄润秋, 巨能攀, 等. 高陡岩质边坡稳定性三维离散元分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(5): 592 - 597. (BAI Yong-jian, HUANG Run-qiu, JU Neng-pan, et al. 3DEC stability analysis of high and steep rock slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(5): 592 - 597. (in Chinese))
- [23] 程东幸, 潘 炜, 刘大安, 等. 锚固节理岩体等效力学参数三维离散元模拟[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2127 - 2132. (CHENG Dong-xing, PAN Wei, LIU Da-an, et al. 3DEC modeling of equivalent mechanical parameters in anchored jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2127 - 2132. (in Chinese))
- [24] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩各向异性岩体力学分析及坝基岩体稳定研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2006. (East China Investigation and Design Institute of CHECC. Research report of anisotropic mechanical analysis and dam base's stability at Baihetan Hydropower Station on Jinsha River[R]. Hangzhou: East China Investigation and Design Institute of CHECC, 2006. (in Chinese))
- [25] 宁宇. 柱状节理岩体等效强度与屈服准则研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (NING Yu. Study on equivalent anisotropic strength and yield criterion of columnar jointed rock mass[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [26] SINGH B. Continuum characterization of jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1973, **10**(4): 311.