

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.10.025

基于节理网络有限元的柱状节理岩体 等效变形模量结构效应研究

崔 臻^{1,2}, 魏 倩^{1,3}, 侯 靖², 盛 谦¹, 李良权²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014 ; 3. 中建三局建设工程股份有限公司技术中心, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 因其特殊的地质成因, 柱状节理成为一种具有强烈非连续性及各向异性的特殊岩体结构。以白鹤滩水电工程设计、建设中所遇到的柱状节理玄武岩体为背景, 针对柱状节理岩体的等效变形模量问题, 在探讨了其结构效应表征参数的基础上, 利用节理网络有限元为工具, 研究各结构效应表征参数对柱状节理岩体等效变形模量的影响。研究结果表明: 在柱轴线横向平面上, 对于柱体不规则程度, 当柱体完全不规则相对于完全规则情况, 等效模量提高大约 10% 左右; 在其他条件不变情况下, 当柱体平均边长从 0.1 m 增加至 0.5 m 时, 等效模量从 5.36 GPa 增加至 23.4 GPa; 对不同加载方向的研究结果表明, 柱状节理在柱轴横向平面上可以视作各向同性; 当节理刚度线性递增时, 相应的岩体等效模量也基本符合线性递增的规律。在平行柱体轴线平面, 节理组 2 间距越大, 柱状节理岩体的等效变形模量越大; 随着错距比的增加, 柱状节理岩体的等效变形模量呈现先增加后减少的趋势, 当错距比为 50% 时, 节理岩体的等效变形模量取最大值; 对于节理刚度的影响, 与柱轴横向平面类似的, 随柱体轴线平面上节理刚度的线性增加, 相应的岩体模量也基本符合线性递增的规律。该研究成果与已有的现场研究成果及三维数值模型成果相比, 吻合良好。说明了文中提供的研究结论具有较好的可信度及参考价值。

关键词: 柱状节理岩体; 等效变形模量; 结构效应; 节理网络有限元; 柱体不规则程度

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 10 - 2921 - 09

Structural effect on equivalent modulus of deformation of columnar jointed rock mass with jointed finite element method

CUI Zhen^{1,2}, WEI Qian^{1,3}, HOU Jing², SHENG Qian¹, LI Liang-quan²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

3. Technical Center of China Construction Engineering Third Bureau, Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: Due to the distinctive formation mechanism of columnar joints, columnar jointed basalt exhibits strong discontinuity and anisotropy. The columnar jointed basalt rock mass in Baihetan project is selected as a case study. The structural control effect on the equivalent modulus of deformation is discussed by using jointed finite element method (JFEM). The results show that, on the transverse plane, the equivalent modulus of deformation increases with the column irregularity, which increases about 10% from completely irregularity to completely regularity. This trend also agrees with the increase of the column size. The equivalent modulus of deformation corresponding to a side length of 0.1 m is 5.36 GPa, and this value increases up to 23.4 GPa for a side length of 0.5 m. Columnar joints rock mass may be considered as isotropic on the transverse plane, and basically, the equivalent modulus of deformation varies correspondingly with joint stiffness. But when it comes to the longitudinal plane, the wider joint spacing of the joint set 2 is, the higher equivalent modulus of deformation is. The equivalent modulus of deformation increases firstly then decreases, and reaches its maximum value when the cross-bedding ratio is 50%. The equivalent modulus of deformation on the longitudinal plane shows a similar correspondence relationship with the joint stiffness on the transverse plane. The simulation results obtained by JFEM agree well with the existing field observations and 3D numerical studies.

Keywords: columnar jointed rock mass; equivalent modulus of deformation; structural effect; jointed finite element method; column irregularity

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973) (No. 2015CB057905); 国家自然科学基金 (No. 51409263, No. 11472292, No. 51309243)。

This work was supported by the National Basic Research Program of China(973 Program) (2015CB057905) and the National Natural Science Foundation of China(51409263, 11472292, 51309243).

第一作者简介: 崔臻, 男, 1986 年生, 博士(后), 助理研究员, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

1 引 言

目前我国正处于岩土工程发展的高峰时期,众多大型水利工程以及大江大河梯级开发项目不断立项动工,深部特长隧洞工程纷纷涌现,能源、废弃物和核废料深部地质储藏(处置)的研究工作相继展开,给国内岩土工程学科的发展带来了巨大的机遇与挑战。

而这些工程项目大多处于岩体之中,并且以性质复杂的节理岩体居多。节理岩体中普遍发育的岩体结构的分布、组合规律将直接控制这些重大工程的稳定性及可能发生的破坏模式^[1-2]。合理确定岩体结构对岩体力学特性的影响,是进行工程设计、变形计算、稳定性评价等环节的前提和保证。

柱状节理作为一种特色鲜明的岩体结构,强烈的不连续性和各向异性是其最大的特点^[3],且由于其结构面形状特殊,不属于岩石力学中的共性问题。早期对柱状节理的研究多集中在旅游业和地质成因等方面,对其力学特性的研究主要集中在近 30 年,20 世纪 80 年代至 90 年代北美的研究成果^[4-5]以试验为主,测定了柱状节理岩体的力学参数,并揭示了柱状节理各向异性程度由节理引起,而不是岩块。近年来对柱状节理岩体的研究主要集中在我国。柱状节理在西南的大型岩石工程早已有揭露(铜街子、溪洛渡),但直到金沙江白鹤滩水电站,柱状节理岩体的不良力学特性和工程问题方才引起足够地关注和重视^[6]。

金沙江白鹤滩水电站装机容量为 16 000 MW,是我国继三峡、溪洛渡之后的又一座千万千瓦级的巨型水电站。工程区域位于一套二叠系上统峨眉山玄武岩中,在坝基和地下厂房区域均揭露出大量密集发育的细长状柱状节理,白鹤滩柱状节理的特点是柱状节理在隐晶质玄武岩中成层发育,但各岩层中柱状节理发育不均匀,柱体大小、长度也不相同,以二迭系厚层玄武岩的第 3 层($P_2\beta_3$ 层)中最为发育,可按发育特征分为不同尺寸范围的 3 类,如图 1 所示。柱状节理对岩体结构和质量分级有重要的控制作用,是工程建设的主要工程地质问题之一^[6]。

长江科学院、成都理工大学、河海大学等机构针对该问题已开展了大量的研究工作。研究手段包括现场调查、室内外试验、数值模拟等多种综合手段^[7-14],在柱状节理岩体的等效力学参数、各向异性特征、卸荷特性等方面取得了大量成果。

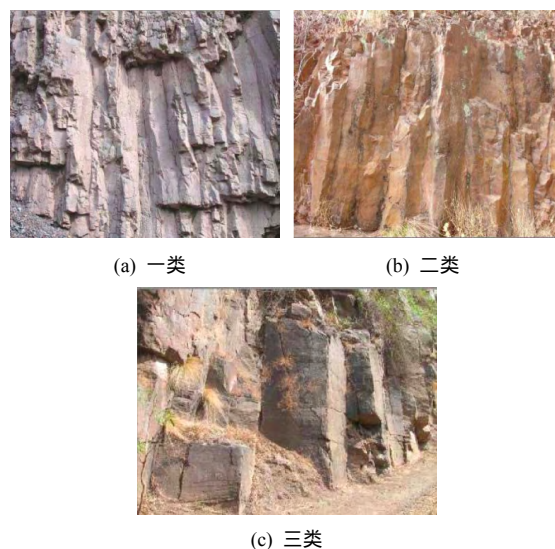


图 1 坝区柱状节理岩体分类

Fig.1 Classification of columnar jointed rock mass in a dam site

在前人研究成果启示下,本文以白鹤滩水电站的不规则柱状节理岩体为研究对象,针对柱状节理结构特征与岩体宏观等效变形模量之间的关系与规律问题,采用数值方法探讨柱状节理岩体的变形性质的结构效应,首先讨论其结构效应的表征参数,继而研究各结构效应表征参数对柱状节理岩体等效变形模量的影响,初步得到了一些结论。

2 原理与方法

2.1 模型的生成

为了通过数值模拟方式计算确定柱状节理岩体的力学参数,首先将其抽象为概化模型,如图 2 所示。约定柱体轴线横向平面为 $x-y$ 平面;柱体轴线方向为 z 轴。当采用二维手段进行模拟分析时,则分别讨论柱体轴线横向平面和柱体轴线平面,如图 3 所示。其中, b 为柱体边长, s_1 为节理组 1 间距, s_2 为节理组 2 间距, L/s_2 为错距比。

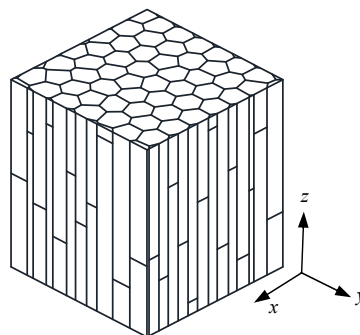


图 2 柱状节理岩体概化模型

Fig.2 Conceptual model of columnar jointed rock mass

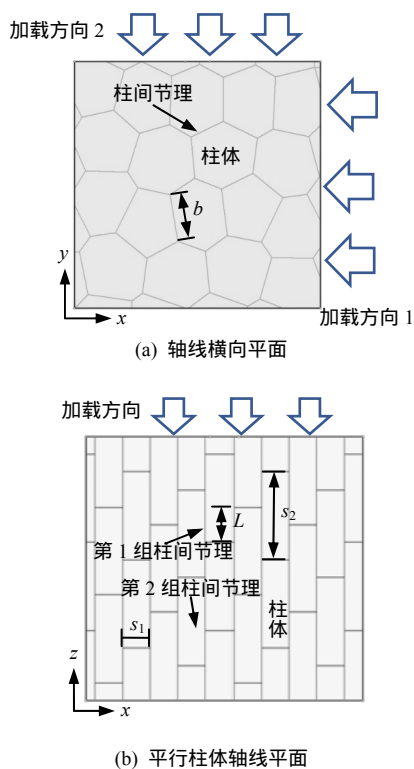


图 3 柱状节理岩体各平面计算简图
Fig.3 Sketch of columnar jointed rock mass

对于如图 3 中具有较多结构的岩体概化模型，一般认为仅有离散元软件可以进行处理。但常见的商业离散元软件中（如 UDEC、3DEC）多采用单积分点的常应变单元^[15]，使得应力计算结果精度相对较低。而节理网络有限元（jointed finite element method, JFEM）技术的出现，使得在应力计算精度相对较高的有限元方法中考虑较多节理、裂隙成为可能。

虽然从 1960 年起，有限单元法中即可以通过采用 Goodman 节理单元来考虑有限的岩体结构，但直到近几年，随着计算机计算能力的大幅提高，有限单元法方能计算更为真实情况下密集分布的岩体结构，JFEM 方才逐渐实用化^[16-17]。JFEM 中将岩体视为由岩块和节理组成的二元结构，与其他数值方法中岩体中的节理由切割的方式产生相比，JFEM 的特色为：其中的岩体结构通过直接嵌入一个完整的节理网络（joint network），并将其离散为 Goodman 节理单元的形式生成。此外，JFEM 与离散元等非连续方法具有几乎相同的节理参数、接触判定准则、边界条件、收敛准则，使用上也较为便利^[18-19]。

本文中，JFEM 技术具体在由 Hoek 博士主导、加拿大 Rocscience 公司开发二维有限元软件 Phase2 中实现。根据平面方向，将柱状节理岩体划分为柱体轴线横向平面和平行柱体轴线平面，如图 3 所示。

为了使得数值试件内包含有足够多的节理数量，设置数值试件的边长为较大值 10 m×10 m。数值试验中，为了保证结果精确，计算中采用了 6 节点 3 积分点三角形网格，设定 1%收敛容差。加载面采用位移加载（模拟刚性加载），其他边界采用法向约束。其中一个工况的数值模型算例如图 4 所示。

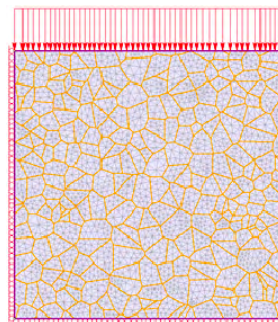


图 4 二维 JFEM 数值计算模型(横向平面，加载方向 2)
Fig.4 2D JFEM numerical model (transverse plane, loading direction 2)

2.2 柱状节理岩体结构效应的表征参数

大量的统计资料表明，节理岩体结构面的几何参数（结构效应参数）是服从一定分布规律的。对柱状节理岩体的这些结构效应参数的变化对岩体变形模量的影响进行考察，可以认为表达了柱状节理岩体变形模量的结构效应。

2.2.1 柱体轴线横向平面

柱状节理的名称来源于岩体中横截面上呈较规则柱状形态的原生张性破裂构造^[12]。冷凝收缩则是目前较多接受的一种柱状节理成因假说，该学说认为，在岩浆冷却过程中，平坦的横截面形成了无数规则而间隔排列的冷凝中心，产生了垂直于中心连线的冷凝张裂缝，使得岩体裂开形成柱体。理想状态下，冷凝中心是均匀分布的等边三角形，冷凝时等边三角形 3 个节点之间产生相等的拉应力，从而最终形成规则的六面体柱体。现实中由于受到各种非均质因素的影响，因此，柱体横截面上会形成不规则的多边形形状。

Voronoi 图是一种关于空间划分的算法，在材料科学中有较为广泛的作用。Voronoi 图算法假定平面上散布的各点为同时点燃的火源，并以相同的速度向所有方向蔓延，火苗交汇之后熄灭处即为各个空间区域的边界。这一过程从机制而言，与柱状节理的成因有相似之处，因此，Voronoi 图也被常用来生成柱状节理岩体的平面结构^[11]。

柱状节理轴线横向平面主要的几何特征有柱体

边长(或直径)及柱体不规则程度(规则六边形~四边到八边形混杂发育)^[12],因此,将这两个指标作为该平面上最主要的结构效应参数。当考虑柱状节理岩体显著的各向异性的存在时,将岩体受载方向与柱间节理的刚度也作为结构参数之一加以研究。

其中,对于 Voronoi 图法生成柱体的过程中不规则程度这一影响因素,本文以完全规则的六面体为不规则程度的下限,以 Voronoi 图算法程序可以生成的最凌乱的柱体模型为上限,定性地将不规则程度划分为完全规则、基本规则、中等规则、不规则 4 种程度,如图 5 所示。

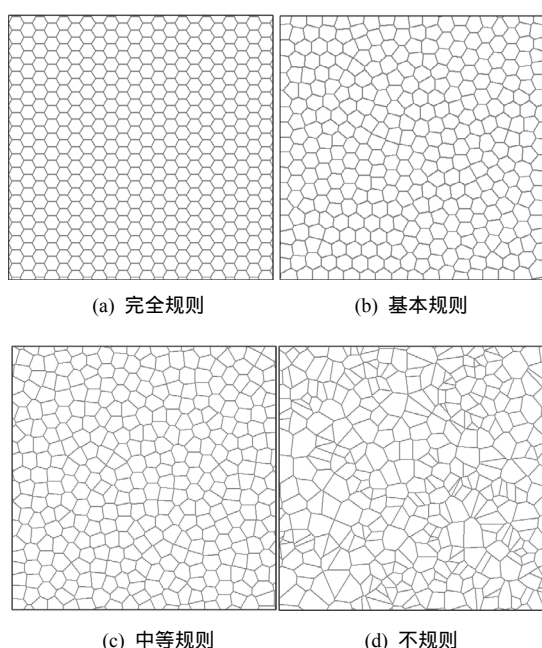


图 5 不同规则程度六边形节理网络模型
Fig.5 Joint network models with different conditions of column irregularity

图 3(a)中的 b 值给出了柱体边长的定义。针对重点研究对象——坝址区密集发育的一类二类柱状节理的玄武岩的实际尺寸。确定本文中柱体边长的讨论范围为[0.1 m, 0.5 m]。

对于各向异性特性中的方向问题,为了体现出足够的差异,本文选取了两个正交的加载方向进行研究。为了讨论的方便,称为 x 向与 y 向,如图 3(a)所示。

此外,柱面结合紧密程度、风化特征对柱状节理岩体力学特征的影响,反映在数值模拟中,即为柱间节理的节理刚度。为了间接反映不同柱面特性对柱状节理岩体等效力学参数的影响,此处也将柱间节理的刚度参数作为一个结构效应参数进行讨论。

对于计算中采用的岩块及柱间节理的力学参数,岩块的弹性模量按室内单轴压缩试验得到的弹性模量考虑,而柱间节理的基准刚度值按照根据工程岩体分级得到的白鹤滩 1 类柱状节理岩体平均变形模量(15 GPa)进行反算得到。当需要研究柱间节理刚度对柱状节理岩体变形模量的影响时,以节理基准值为中值,分别浮动 $\pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$,取得低值、中低值、中高值、高值,如表 1 中后 4 行所示。

表 1 岩石与柱间节理的力学参数

节理岩体	变形模量 E / GPa	泊松比 ν	法向刚度 K_n / (GPa/m)	切向刚度 K_s / (GPa/m)
岩块	60	0.2		
节理(基准)			40	15.00
节理(低值)			10	3.75
节理(中低值)			20	7.50
节理(中高值)			60	22.50
节理(高值)			80	30.00

2.2.2 平行柱体轴线平面

对于平行柱体轴线平面上的概化模型,本质上该平面的节理网络图为一组规则贯通节理与一组正交的非贯通节理的组合。分别称之为第 1、2 组节理,如图 3 所示。根据规则贯通节理的等效变模计算理论^[20],铅直状的节理组 1 间距 s_1 与岩体的等效变模无关。因此,该平面上的结构效应参数只有节理组 2 的间距 s_2 与节理组 2 的错距比 L/s_2 ,其定义如图 3 所示。

对于节理组 2 的间距指标 s_1 ,结合一类和二类柱状节理玄武岩的实际长宽比范围^[2-6],确定研究范围为[0.6 m, 1.8 m]。两个不同间距的柱状节理模型如图 6 所示。

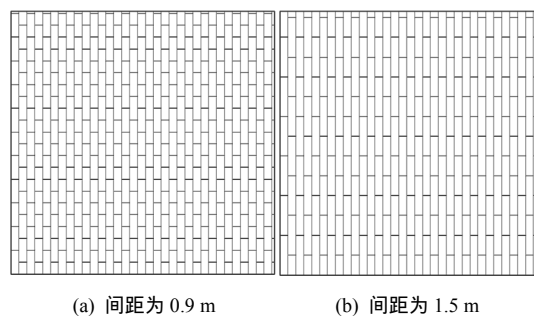


图 6 节理组 2 不同间距(s_2)的柱状节理模型
Fig.6 Joint network models with different values of s_2

对于错距比指标,确定研究范围为[0%, 100%],两个不同错距比的柱状节理模型如图 7 所示。

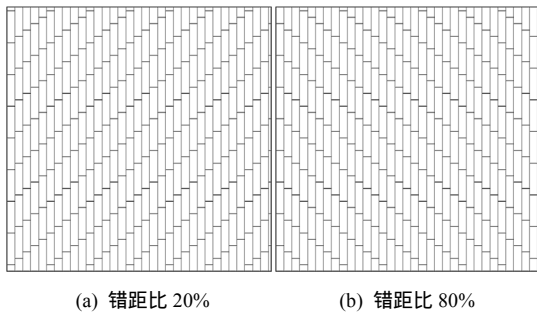


图 7 不同错距比(L/s_2)的柱状节理模型

Fig.7 Joint network models with different values of L/s_2

对于平行柱体轴线平面，也将柱间节理刚度对柱状节理岩体变形模量的影响一并研究，其参数及变化范围也如表 1 所示。

2.3 数值模拟成果正确性验证

在后续讨论之前，为了说明本文采用的 JFEM 数值模拟方法可以较为正确地模拟柱状节理的等效变形参数，选取已发表文献中相关研究成果进行对比分析。文献[14]以三维离散元为研究工具，同样采用了 Voronoi 图法构建柱状节理岩体，讨论了柱状节理岩体的等效变形模量的尺寸效应。

以尺寸为 30 cm 的二类柱状节理岩体为对比项目，本文的研究结论与文献[14]的成果对比如表 2 所示，其中本文模拟参数使用表 1 中基准参数，而现场研究成果来源于文献[14]。

表 2 研究成果对比分析

Table 2 Comparison of field and numerical results

结果来源	柱轴线横向平面变形模量/ GPa		平行柱轴平面变形模量/ GPa
	方向 1	方向 2	
现场试验结果 ^[14]	13.24	13.22	41.05
模拟成果 ^[14]	13.67	14.13	39.92
本文研究成果	14.99	14.73	30.49

对比结果表明，本文采用二维节理网络有限元的模拟成果与现有的三维模拟成果及现场研究成果吻合良好。说明了本文采用的模拟方法较为可靠，后续研究结论也具有较好的可信度。

3 柱状节理岩体等效模量的结构效应

为了研究结果的简洁明了，除针对个别指标外，对每一个指标进行研究时均采用单因素研究法——即仅改变当前研究的指标，而不改变其他指标。

因此，对于柱体轴线横向平面，若未提到其他模拟条件，对应的基本研究方案为：柱体中等规则、柱体边长为均值 0.3 m、加载方向为 y 、柱间节理参数为基准值。

对于平行柱体轴线平面，同样地，对应的基本研究方案为：第 1 组节理间距为 0.3 m，第 2 组节理间距为 1.2 m，错距比为 50%，柱间节理参数为基准值。

3.1 柱体轴线横向平面

3.1.1 柱体不规则程度的影响

图 8 为柱体轴线横线平面上，对应基本研究方案的完全规则、基本规则、中等规则、不规则条件下，柱状节理岩体 $x-y$ 平面上 y 加载方向的变形模量。由于每一次 Voronoi 图生成的过程中具有随机性，因此，每种参数水平下采用 10 次随机模拟的柱体模型进行计算，取其平均值作为该参数水平下的结果代表值。对应各柱体规则程度的等效变形模量值分别为 13.76、14.00、14.73、15.18 GPa。即在其他条件相同的情况下，柱体越不规则，柱状节理岩体的等效变形模量越大。柱体完全规则与完全不规则的假定下，岩体等效模量的差异约为 10%左右。

从力学机制角度，这一现象可做如下解释：柱体排列越不规则，结构体之间的咬合程度越高，节理间相对滑动能力较低，降低了节理岩体的变形量，导致节理岩体的等效变形模量随着柱体规则程度的降低而增大。

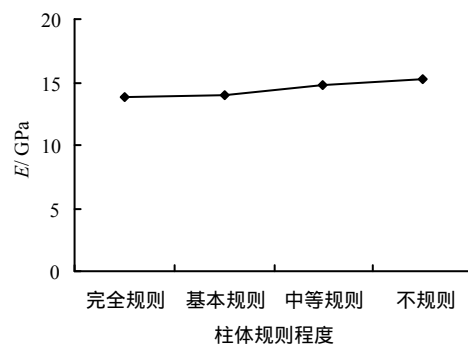


图 8 不同柱体规则程度下柱状节理岩体的变形模量

Fig.8 Equivalent elastic moduli under different conditions of column irregularity

3.1.2 柱体边长的影响

图 9 为柱体轴线横线平面上，对应基本研究方案下柱体平均边长分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m 时，柱状节理岩体 $x-y$ 平面上 y 加载方向的变形模量。由于本指标的研究过程中仍有随机性因素影响，因此，同样采用了取 10 次随机样本平均值的方法消除随机性影响。对应不同柱体平均边长的等效变形模量值分别为 5.36、11.28、14.73、18.84、23.4 GPa。即在其他条件相同的情况下，柱体尺寸越大，柱状节理岩体的等效变形模量越大。

从力学机制上,这一现象理解为当柱体平均边长逐步递增时,岩体中节理条数减少、密度减小,节理对岩体变形性质的弱化程度较小,从而节理岩体等效变形模量逐步增大。这一现象与工程实践中,尺寸较小的一类柱状岩体的力学性质远差于尺寸较大的三类柱状节理岩体的一般认识相符合^[12-13]。

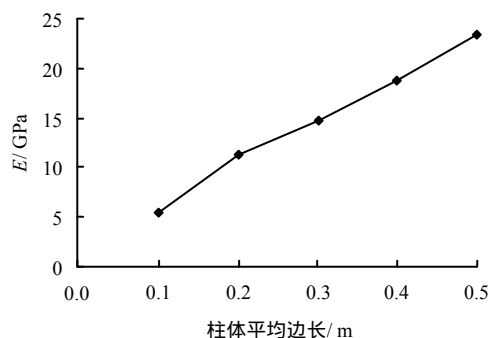


图9 不同柱体平均边长下柱状节理岩体的变形模量
Fig.9 Equivalent elastic moduli with different average column sizes

3.1.3 平面内受载方向的影响

在 2.1 节的研究中,均仅进行了 y 向的加载,但尚未回答柱状节理岩体在该平面是否可以认为是各向同性这一关键问题。因此,此处给出了对应以上研究内容的 x 向加载试验成果,如图 10、11 所示。对比两个方向的加载试验成果, x 向模量与 y 向的模量差异范围在 $-0.64 \sim 0.5$ GPa 左右,差异百分比一般小于 3%。

因此,柱状节理岩体在柱轴横向平面上可以视作各向同性,且该各向同性性质基本不受柱体规则程度及柱体尺寸的影响。

3.1.4 柱间节理刚度的影响

当研究柱间节理刚度效应对柱状节理岩体的效应时,在不改变法向/切向刚度比值的前提下,对于对应基准节理刚度值 25%~200%的低值、中低值、

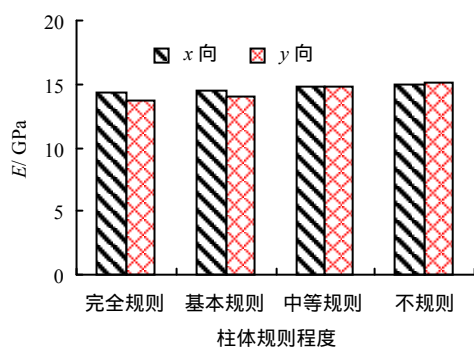


图10 不同柱体规则程度下岩体的 x 、 y 向变形模量对比
Fig.10 x -direction modulus vs. y -direction modulus under different conditions of column irregularity

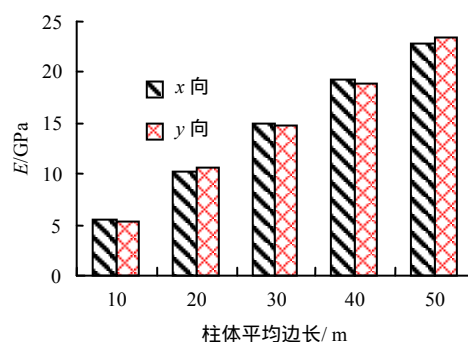


图11 不同柱体平均边长下岩体的 x 、 y 向变形模量对比
Fig.11 x -direction elastic modulus vs. y -direction elastic modulus with different average column sizes

中高值、高值条件下的柱状节理岩体等效变形模量值如图 12 所示。

研究表明,对应线性递增的各节理刚度等级,相应的岩体模量也基本符合线性递增的规律。进一步的研究还表明,这一线性递增的规律不受柱体不规则程度及柱体边长变化的影响。

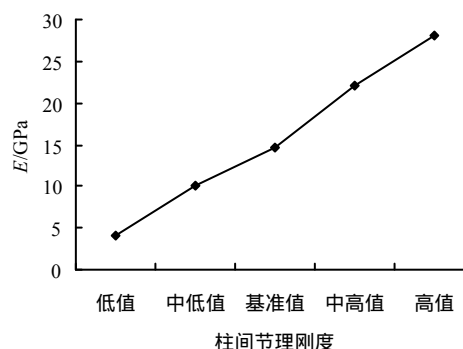


图12 不同柱间节理刚度下柱状节理岩体的变形模量
Fig.12 Equivalent elastic moduli with different values of joint stiffness

3.2 平行柱体轴线平面

3.2.1 节理组 2 间距的影响

图 13 为在柱体轴线平面上,对应基本研究方案下节理组 2 间距分别为 0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 m 时,柱状节理岩体 x - z 平面上 z 加载方向的变形模量。对应不同柱体平均边长的等效变形模量值分别为 22.67、26.73、30.50、34.24、36.34 GPa。即在其他条件相同的情况下,节理组 2 间距越大,柱状节理岩体的等效变形模量越大。

作为对比,将节理组 2 视作连通率 50%的单组节理,按照节理岩体等效模量计算理论^[20],计算得到了理论解,如图 13 所示。其结果除量值有所差异外,柱状节理中节理组 2 间距的影响与连通率 50%的单组节理岩体中节理间距的影响规律基本一致。

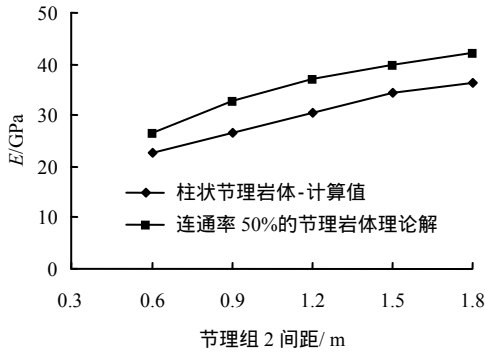


图 13 节理组 2 不同间距下柱状节理岩体的变形模量
Fig.13 Equivalent elastic moduli with different values of s_2

3.2.2 节理组 2 错距比的影响

图 14 为在柱体轴线平面上,对应基本研究方案下节理组 2 错距比分别为 0%~100%时,柱状节理岩体 xz 平面上 z 加载方向的变形模量。随着错距比的增加,柱状节理岩体的等效变形模量呈现先增加后减少的趋势,节理岩体的等效变形模量取值范围为 24.13~30.49 GPa,其中,当错距比为 50%时,节理岩体的等效变形模量取最大值。错距比对柱状节理等效变模的影响最大在 20%左右。可以认为错距比在 50%时,柱状节理嵌固最好,因此,此时具有较大的变形模量。文献[13]基于复合材料力学方法进行了理论推导,也得到了相同的结论。

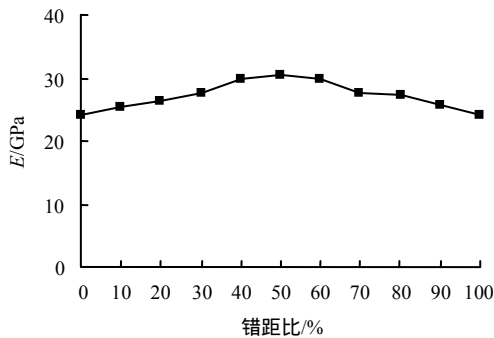


图 14 节理组 2 不同错距比下柱状节理岩体的变形模量
Fig.14 Equivalent elastic moduli with different values of L/s_2

3.2.3 柱间节理刚度的影响

当研究柱间节理刚度效应对柱状节理岩体的效应时,在不改变法向/切向刚度比值的前提下,对于对应基准节理刚度值 25%~200%的低值、中低值、中高值、高值条件下的柱状节理岩体等效变形模量值如图 15 所示。研究表明,对应线性递增的各节理刚度等级,相应的岩体模量也基本符合线性递增的规律。

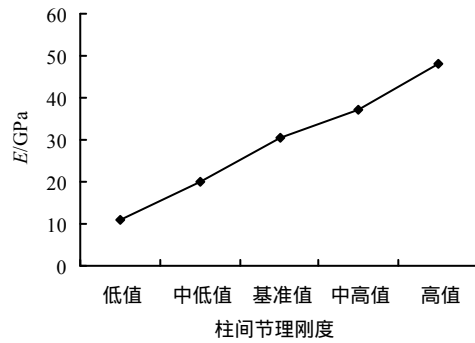


图 15 不同柱间节理刚度下柱状节理岩体的变形模量
Fig.15 Equivalent elastic moduli with different values of joint stiffness

4 结 论

(1) 采用节理网络有限元方法研究柱状节理的等效变形模量问题是可行的。柱体轴线横向平面上的结构效应参数可由柱体规则程度、柱体边长表达;平行柱体轴线平面上的结构效应参数可由节理组 2 间距、节理组 2 错距比来表述。

(2) 在柱体轴线横向平面上,对于柱体不规则程度,当柱体完全不规则相对于完全规则情况,等效模量提高大约 10%左右;其他条件不变情况下,当柱体平均边长从 0.1 m 增加至 0.5 m 时,等效模量从 5.36 GPa 增加至 23.4 GPa;对不同加载方向的研究结果表明,柱状节理在柱轴横向平面上可以视作各向同性;当节理刚度线性递增时,相应的岩体等效模量也基本符合线性递增的规律。

(3) 在平行柱体轴线平面,节理组 2 间距越大,柱状节理岩体的等效变形模量越大,其影响与连通率 50%的单组节理岩体中节理间距的影响规律基本一致;随着错距比的增加,柱状节理岩体的等效变形模量呈现先增加后减少的趋势,当错距比为 50%时,节理岩体的等效变形模量取最大值,错距比可对等效模量产生 20%左右程度的影响;与柱轴横向平面类似,随柱体轴线平面上节理刚度的线性增加,相应的岩体模量也基本符合线性递增的规律。

(4) 本文的研究成果与已有的现场研究成果及三维数值模型成果相比,吻合良好。说明了本文提供的研究结论具有较好的可信度及参考价值。

参 考 文 献

[1] 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 geomechanics for rock engineering[M]. Beijing: Science Press, 1979.

- [2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
SUN Guang-zhong. Mechanics for rock structures[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [3] 江权, 冯夏庭, 樊义林, 等. 柱状节理玄武岩各向异性特性的调查与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2527 - 2536.
JIANG Quan, FENG Xia-ting, FAN Yi-lin, et al. Survey and laboratory study of anisotropic properties for columnar jointed basaltic rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2527 - 2536.
- [4] KIM K, CRAMER M L. Rock mass deformation properties of closely jointed basalt[J]. **Rock Mechanics**, 1989, 1(1): 35 - 45.
- [5] SCHULTZ R A. Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1995, 28(1): 1 - 15.
- [6] 石安池, 唐鸣发, 周其健. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2079 - 2085.
SHI An-chi, TANG Ming-fa, ZHOU Qi-jian. Research of deformation characteristics of columnar jointed basalt at Baihetan hydropower station on Jinsha river[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2079 - 2085.
- [7] 周火明, 陈文华, 黄世强, 等. 柱状节理玄武岩物理力学特性试验研究报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2006.
ZHOU Huo-ming, CHEN Wen-hua, HUANG Shi-qiang, et al. Experimental study on the physical and mechanical properties of columnar jointed basalt[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2006.
- [8] 卢轶然. 柱状节理玄武岩变形各向异性研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010.
LU Yi-ran. Deformation anisotropy study of columnar jointed rock masses[D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2010.
- [9] 张春芳. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体结构及质量分级研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
ZHANG Chun-fang. Baihe Jinsha River Hydropower Station columnar joints basalts rockmass structural and quality classification[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 徐卫亚, 郑文棠, 石安池, 等. 水利工程中的柱状节理岩体分类及质量评价[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 262 - 271.
XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, SHI An-chi, et al. Classification and quality assessment of irregular columnar jointed basaltic rock mass for hydraulic engineering[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2011, 42(3): 262 - 271.
- [13] 狄圣杰, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体横观各向同性本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 881 - 888.
DI Sheng-jie, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Transversely isotropic constitutive properties of a columnar jointed rock mass[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2011, 40(6): 881 - 888.
- [14] 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 - 251.
YAN Dong-xu, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(2): 243 - 251.
- [15] Itasca Consulting Group Inc. UDEC (Universal distinct element code) background—The 2D distinct element method (version 6.0)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2014.
- [16] HAMMAH R E, YACOUB T E, CORKUM B, et al. The practical modelling of discontinuous rock masses with finite element analysis[C]//Proceedings of the 42nd U.S. Symposium on Rock Mechanics and the 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Alexandria, Virginia, USA: American Rock Mechanics Association, 2008.

- Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 586 - 596.
- [8] 潘俊锋, 宁宇, 杜涛涛, 等. 区域大范围防范冲击地压的理论与体系[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1803 - 1809. PAN Jun-feng, NING Yu, DU Tao-tao, et al. The theory and system for preventing rock burst in large-scale areas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(11): 1803 - 1809.
- [9] 王凯兴, 潘一山. 冲击地压矿井的围岩与支护统一吸能防冲理论[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2585 - 2590. WANG Kai-xing, PAN Yi-shan. An undified theory of energy absorption and anti-impact for surrounding rock and support in rock burst mine [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2585 - 2590.
- [10] 王学滨, 潘一山, 海龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 588 - 591. WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, HAI Long. Instability criterion of fault rockburst based on gradient-dependent plasticity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 588 - 591.
- [11] 孙振武, 代进, 杨春苗, 等. 矿山井巷和采场冲击地压危险性的弹性能判据[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 794 - 798. SUN Zhen-wu, DAI Jin, YANG Chun-miao, et al. Elastic energy criterion of rockburst in roadway and coal face of mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(8): 794 - 798.
- [12] TAN Y L, ZHANG Z. Rock burst disaster induced by mining abutment pressure[J]. **Disaster Advances**, 2012, 5(4): 378 - 382.
- [13] TAN Y L, ZHAO T B, XIAO Y X. In situ investigations of failure zone of floor strata in mining close distance coal seams[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(5): 865 - 870.
- [14] 谭云亮, 宁建国, 顾士坦, 等. 矿山压力与岩层控制(修订本)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011. TAN Yun-liang, NING Jian-guo, GU Shi-tan, et al. Ground pressure and strata control (Revised version) [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
- [15] GRIFFITH W A, BECKER J, CIONE K, et al. 3D topographic stress perturbations and implications for ground control in underground coal mines[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 70(9): 59 - 68.
- [16] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型冲击地压机制的细观实验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1 - 6. QIAN Qi-hu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 1 - 6.
- [17] 赵毅鑫, 姜耀东, 田素鹏. 冲击地压形成过程中能量耗散特征研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1979 - 1983. ZHAO Yi-xin, JIANG Yao-dong, TIAN Su-peng. Investigation on the characteristics of energy dissipation in the preparation process of coal bumps[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(12): 1979 - 1983.
- [18] 代黎光. 大安山煤矿深部冲击地压的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008. DAI Li-guang. The study on deep rockburst of Daanshan coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2008.

上接第 2928 页

- [17] HAMMAH R E, YACOUB T, CURRAN J H. Variation of failure mechanisms of slopes in jointed rock masses with changing scale[C]//Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Toronto, Ontario, Canada: Canadian Association of Rock Mechanics, 2009.
- [18] RIAHI A, HAMMAH R E, CURRAN J H. Limits of applicability of the finite element explicit joint model in the analysis of jointed rock problems[C]// Proceedings of the 44th U.S. Symposium on Rock Mechanics and the 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Alexandria, Virginia, USA: American Rock Mechanics Association, 2010.
- [19] 王宇, 李晓, 刘帅, 等. 岩体离散裂隙网络稳定性计算的节理有限元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3337 - 3346. WANG Yu, LI Xiao, LIU Shuai, et al. Stability calculation for discrete fracture network of rock masses based on joint finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3337 - 3346.
- [20] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础[M]. 第三版. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1981. JAEGER J C, COOK N G W. Rock mechanics[M]. 3rd ed. Translated by Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1981.