

文章编号: 1000-4750(2015)03-0090-07

基于离散元的柱状节理岩体等效弹性模量尺寸效应研究

倪海江^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 石安池³, 徐建荣³, 吉 华^{1,2}

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

3. 中国水电顾问集团, 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

摘 要: 尺寸效应的研究在评估节理/裂隙岩体力学性质方面具有重要意义, 通过离散元数值方法研究尺寸效应。引入 Voronoi 图模拟随机节理, 以相对标准差为标准, 衡量试验结果的稳定性和可靠度, 进行了足够次数不同尺寸的单轴压缩数值试验。进而采用统计方法分析 E_{eq} (等效弹性模量)和 $1/E_{eq}$ (等效柔量)的尺寸效应。研究表明: 相对标准差值为 5% 对应的变形 REV(representative elementary volume)尺寸约为 4 倍 Voronoi 多边形平均边长; 样本 E_{eq} 的均值随着尺寸的增大显著降低, 而样本 $1/E_{eq}$ 的均值随尺寸变化很小。对结论的适用性进行了分析, 实际工程中多采用样本 E_{eq} 的均值估算岩体的整体等效弹性模量, 建议同时采用 $1/E_{eq}$ 均值的倒数估算其下限。并将此方法应用于白鹤滩水电站节理岩体原位变形试验成果的分析。

关键词: 岩石力学; 尺寸效应; 离散元; 表征单元体积(REV); 弹性模量; 节理/裂隙岩体

中图分类号: TU452 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.09.0849

SCALE EFFECT ON EQUIVALENT CONTINUUM ELASTIC MODULUS OF COLUMNAR JOINTED ROCK MASSES BY DISTINCT ELEMENT METHOD

NI Hai-jiang^{1,2}, XU Wei-ya^{1,2}, SHI An-chi³, XU Jian-rong³, JI Hua^{1,2}

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

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Scale effects play an important role in evaluating mechanical properties of jointed/fractured rock masses. These phenomena were studied through use of the distinct element method. The Voronoi diagram was introduced to simulate stochastic joints, and the coefficient of variation (CV) was used to estimate the resolution of a certain property from numerical tests. A large number of numerical tests with different geometric sizes were carried out. Then, the scale effects of equivalent continuum elastic modulus, E_{eq} and equivalent continuum elastic compliance, $1/E_{eq}$ were statistically analyzed. The investigation shows that: the estimated deformation REV size is about 4 times of average side length of a Voronoi polygon with acceptable variations for CV of 5%; the mean value of specimen's E_{eq} obviously decreases as size increases, and the mean value of specimen's $1/E_{eq}$ increases slightly with increasing size. In discussing the applicability of the results, it is better to adopt the reciprocal of a

收稿日期: 2013-09-10; 修改日期: 2014-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB06B01); 国家自然科学基金和法国国家科研署联合基金项目(50911130366).

通讯作者: 倪海江(1986—), 男, 浙江绍兴人, 博士生, 主要从事节理/裂隙岩体的力学特性研究(E-mail: nihaijiang@126.com).

作者简介: 徐卫亚(1962—), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩石力学与工程等方面的教学与研究工作(E-mail: wyxu@hhu.edu.cn);

石安池(1965—), 男, 湖北黄梅人, 教授级高工, 博士, 主要从事水利水电工程地质勘察与岩石力学等方面的研究工作(E-mail: shi_ac@ecidi.com);

徐建荣(1964—), 男, 江苏苏州人, 教授级高工, 硕士, 主要从事水利水电工程设计工作(E-mail: xu_jr@ecidi.com);

吉 华(1987—), 男, 江苏苏州人, 博士生, 主要从事岩石力学方面的研究(E-mail: lomojack@163.com).

mean specimen's $1/E_{eq}$ as the lower bound of E_{eq} , while the mean specimen's E_{eq} should be used as the effective E_{eq} in engineering. This method was finally applied to analysis deformation data from in situ tests of Baihetan Hydropower Station.

Key words: rock mechanics; scale/size effects; distinct element method; representative elementary volume (REV); elastic modulus; jointed/fractured rock masses

材料的力学性质往往会随着试验尺寸的变化而变化, 这种有趣的现象被称为尺寸效应。尺寸效应的研究在评估节理/裂隙岩体力学性质方面具有重要意义。Hudson 和 Harrison^[1]引入了表征单元体积的概念 REV(如图 1), 表示某一特性趋于稳定时的最小尺寸, REV 是度量岩体能否视为等效连续体的基本标准。Oda^[2]得到 REV 尺寸应该在 3 倍的典型节理出露迹长以上。宁宇等^[3]引入 Voronoi 方法对白鹤滩水电站柱状节理岩体进行随机模拟, 得到其 REV 尺度约为典型节理迹长的 3 倍~4 倍。为了准确定量地计算 REV 值, Min 等^[4-5]引入了相对标准差系数 CV, 定义为试验结果的标准差与均值的比值。在 REV 尺度内试验结果的离散性往往较大。以白鹤滩水电站工程坝基基岩部分柱状节理岩体承压板试验为例, 出现有两试验点相隔仅 2m, 试验结果相差却有一倍之多的情况^[6]。离散性如此之大的试验结果能否准确预测岩体的真实参数、如何分析和选取参数等问题急需解决。为更加全面细致地评价尺寸效应, Kanit 等^[7]引入统计方法, 分析不同边界条件下随机复合材料的弹性模量与尺寸的关系, 本文采用期望函数描述试验结果均值随尺寸变化的总体趋势, 采用方差函数描述试验结果离散度的尺寸依赖性。

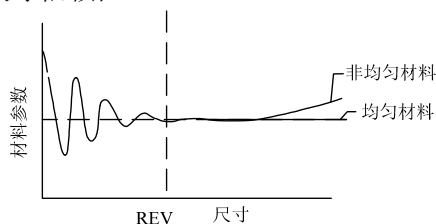


图1 REV 基本概念(根据 Hudson 和 Harrison^[1])

Fig.1 REV concept (after Hudson and Harrison^[1])

周火明等^[8]采用多种手段研究三峡永久船闸边坡卸荷带岩体变形参数, 建立了岩体变形模量与岩体尺寸之间的关系, 发现了明显的尺寸效应。而 Yoshinaka 等^[9]研究发现室内试验和现场试验成果表现出的弹性模量的尺寸效应部分是由于不同的试验方法和边界条件造成的, 通过数值方法修正后尺寸效应减弱。孙广忠^[10]、Hudson^[11]等认为试件尺

寸愈小, 占有结构面和结构体的数量愈小, 小到一定尺寸就成为完整的单一结构体, 有些研究以此说明节理岩体等效弹性模量、强度等随着尺寸增大而降低。类比室内试验和现场试验, 这种解释有一定的合理性, 但是这和取样的主观性密切相关, 如果等概率取样, 部分小尺寸试样包括的结构面密度可能更高。Barton^[12]在回顾了大量岩石工程方面尺寸效应的研究后, 指出取样存在偏见和扰动, 导致了一些尺寸效应的不正确的结论。试样尺寸、试验对象、试验方法、边界条件、分析方法等因素不同均会造成试验结果不同, 本研究仅关注模型(试样)尺寸不同所引起的结果差异, 而限定其它非尺寸因素相同或一致。

数值方法是研究节理岩体变形尺寸效应的有效方法之一。宁宇等^[3,4,6]的数值研究成果显示等效弹性模量均值没有明显的尺寸依赖性。Esmaili 等^[5]研究却发现等效弹性模量均值随着尺寸的增大而显著减小。上述研究成果均表明等效弹性模量离散度随着尺寸的增大而减小, 特别是小尺寸试验结果离散度相当大, 然而数值试验次数偏少, 统计结果的可靠性不高, 某种程度上导致了上述研究成果结论的不一致。本文根据不同的试验尺寸进行了不同次数足量的数值试验, 以使样本变形参数的统计结果(如均值、标准差等)精确可信。

值得注意的是尺寸效应和表征单元体 RVE (representative volume element, 与 REV 一致)在复合材料、固体力学等领域有着广泛应用, 许多专家和学者对此进行了深入研究^[7,14-15]。岩体变形特性的尺寸效应研究成果相对较少, 其他领域的研究成果值得参考, 更为重要的是借鉴其研究思路及研究方法。本文基于 Itasca 公司开发的二维离散元软件 UDEC 进行数值计算, 进行了足够次数的单轴压缩数值试验, 分析 Voronoi 随机节理岩体变形特性的尺寸效应, 证实在复杂情况下以上结论的适用性, 并对 $1/E_{eq}$ 的统计特性进行了进一步分析, 最后将研究成果应用于白鹤滩水电工程节理岩体原位变形试验成果的分析。

1 数值试验

1.1 基于 Voronoi 随机裂隙的数值模型

N 个在平面上有区别的点，按照最近邻原则划分平面，每个点与它的最近邻区域相关联，划分得到的结果既是 Voronoi 图。Voronoi 图基本概念可形象描述如下：区域内有 n 个火源，这 n 个火源同时点燃，并以相同速度向所有方向蔓延，当两个火源扩散后相遇时熄灭，那么燃烧熄灭处所形成的图便是 Voronoi 图^[13]。Voronoi 图是重要的几何结构，在随机模型方面也有着广泛应用^[16]。UDEEC 自带了 Voronoi 随机节理生成函数，生成方法的基本思路如下：在区域内生成随机点，这些点随着迭代过程而移动，迭代次数越多，点的分布越有序，本文中 Voronoi 多边形的平均边长 $l_{vor}=0.2m$ ，迭代次数为 10(默认迭代次数为 5)；接着，在所有点之间生成三角形；最后通过所有具有公共边的三角形的垂直平分线建立 Voronoi 多边形，并通过模型边界修剪多边形。

1.2 参数、边界条件及等效弹性模量计算方法

完整岩石采用各向同性弹性本构，节理模型采用库伦滑移模型，计算采用的完整岩石及节理物理力学参数见表 1。

表1 岩石及节理物理力学参数^[17-18]

Table 1 Physical-mechanical parameters of rock and joints

完整岩石			节理面参数			
密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	法向刚度/ ($GPa \cdot m^{-1}$)	切向刚度/ ($GPa \cdot m^{-1}$)	粘聚力/ MPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
2900	65.1	0.23	204.1	69.7	0.6	36.0

图 2 显示了尺寸为 $0.1m \times 0.1m$ 的 Voronoi 随机节理岩体二维数值模型。模型下表面竖向位移固定，首先考虑试样自重计算至初始平衡，接着在上表面加一均布压应力 $s=1.0MPa$ ，此边界条件用以模拟应力控制的单轴压缩试验^[19]，应力相对较低，节理间未出现滑移现象，应力应变基本呈线性关系。

一般而言，网格越细精度越高，本文统一采用边长小于 $0.01m$ 的三角形单元划分网格。单轴压缩数值试验结束后，提取上表面上每个网格节点的位移，并取平均值作为上表面的平均位移，记为 \bar{d} ，对于 $l \times l$ 尺寸的试样，采用以下公式计算等效弹性模量。

$$E_{eq} = \frac{sl}{d} \tag{1}$$

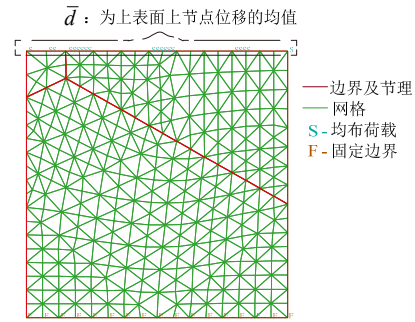


图 2 $0.1m \times 0.1m$ 的 Voronoi 随机节理岩体数值模型及其边界条件

Fig.2 Numerical model of Voronoi stochastic jointed rocks and boundary conditions, $0.1m \times 0.1m$

1.3 不同尺寸的离散元数值模型

本文选取了从 $0.1m \times 0.1m$ 到 $1m \times 1m$ 的 8 组数值模型尺寸，并对每个尺寸进行不同次数大量数值试验(如图 3 所示)，以保证在此基础上的统计结果的可靠性，具体试验尺寸及对应数值试验次数见表 2 第一列、第二列。

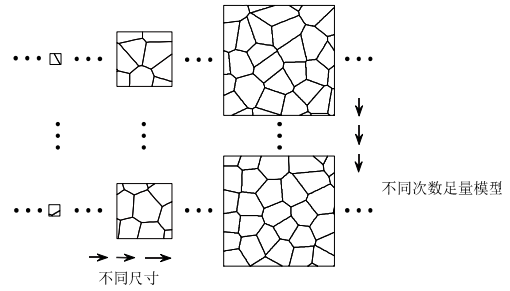


图 3 生成的各种节理岩体示意图，图中随机 Voronoi 模型尺寸分别为 $0.1m \times 0.1m$ 、 $0.5m \times 0.5m$ 、 $1.0m \times 1.0m$

Fig.3 Schematic view of generations of jointed rock masses, the size of stochastic Voronoi models in the figure are $0.1m \times 0.1m$ 、 $0.5m \times 0.5m$ and $1.0m \times 1.0m$, respectively

表 2 足量的数值试验及其结果的统计分析

Table 2 Number of numerical simulations and the statistical analysis of the results

尺寸 $l \times l/m$	试验数/次	\bar{E}_{eq}/GPa	$(1/\bar{E}_{eq})/GPa$	$CV(1/\bar{E}_{eq})/(\%)$
0.1	4128	35.2	23.5	0.90
0.15	1349	27.5	23.1	0.92
0.2	644	24.4	23.0	0.82
0.3	225	22.9	22.5	0.92
0.4	123	22.6	22.4	0.87
0.5	106	22.3	22.2	0.71
0.6	101	22.7	22.6	0.70
0.7	93	22.5	22.4	0.57
0.8	77	22.6	22.6	0.57
0.9	55	22.4	22.4	0.63
1.0	34	22.4	22.4	0.64

二维离散元计算效率较高,易于在合理时间内实现精细的网格划分和大量的数值试验计算,本文采用二维模型计算主要是为研究节理岩体变形特性尺寸效应的基本规律,其适用范围和具体应用等有待三维计算的进一步研究和相关试验成果等的验证。

2 数值试验结果分析

2.1 等效弹性模量和柔量尺寸效应对比分析

图 4、图 5 分别显示了数值试验所得到的等效弹性模量 E_{eq} 和柔量 $1/E_{eq}$ 与尺寸的关系曲线。一方面:试验结果的离散度随着尺寸的增大而减小,试样尺寸为 2 倍 Voronoi 多边形平均边长 l_{vor} 时(即 0.4m), E_{eq} 和 $1/E_{eq}$ 的 CV 值分别为 10.08% 和 9.67%, 试样尺寸为 $4l_{vor}$ 时(即 0.8m), E_{eq} 和 $1/E_{eq}$ 的 CV 值分别为 4.95% 和 4.96%, 大于此尺寸的试验结果基本趋于稳定。另一方面:当尺寸较小时, $\overline{E_{eq}}$ (样本 E_{eq} 的均值)随着尺寸的增大显著降低,尺寸小于 1 倍 l_{vor} 的结果相对于大尺寸结果误差大于 9.00%, 已无法准确预测整体岩体的 E_{eq} ; $\overline{1/E_{eq}}$ (样本 $1/E_{eq}$ 的平均值)随着尺寸增大略有增大,即使当最小尺寸 ($0.5l_{vor}$, 试验结果的离散性非常大,此时单个试验结果的相对标准误差高达 57.79%)时,相对于大尺寸结果误差亦仅为 5.03%, 足量小尺寸样本的 $\overline{1/E_{eq}}$ 能够较好预测节理岩体整体的 $1/E_{eq}$ 。工程上多采用样本均值 $\overline{E_{eq}}$ 直接预测岩体的整体等效弹性模量,表 2 第三、四列分别显示了传统方法和通过 $\overline{1/E_{eq}}$ 间接估算岩体整体等效弹性模量的对比结果,两者在大尺寸时结果相当一致,后者估算结果对尺寸敏感度较低,采用 $\overline{1/E_{eq}}$ 间接估算岩体整体等效弹性模量明显优于 $\overline{E_{eq}}$ 估算。

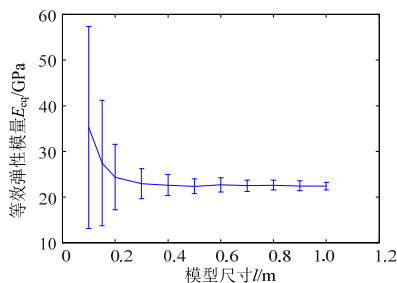


图 4 E_{eq} 与尺寸的关系曲线(误差线中心为均值,上下两端点指示均值 ± 1.0 标准差)

Fig.4 Equivalent continuum elastic modulus correlated with sample length (error bars indicate ± 1.0 standard deviation from the mean)

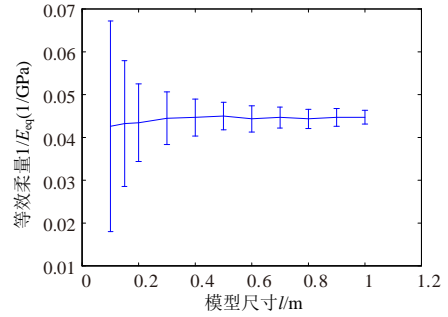


图 5 $1/E_{eq}$ 与尺寸的关系曲线

Fig.5 Equivalent continuum elastic compliance correlated with sample length

2.2 指定精度要求下所需要的试验次数估算

现实工程中试验尺寸往往无法达到 REV 尺寸,而通过大量的小尺寸试验“弥补”尺寸的不足,以上分析证实了足量小尺寸试验结果预测岩体整体弹性模量是可行的(通过柔量间接估算),以下以相对标准差为标准,定量分析在指定精度要求下所需要的试验次数。

对于 n 个 $l \times l$ 尺寸下的任意试验结果 $1/E_{eq}^1, 1/E_{eq}^2, \dots, 1/E_{eq}^n$, 它们是独立同分布的随机变量序列,其公共期望为 μ , 标准差为 σ , 则柔量均值 $\overline{1/E_{eq}}$ 的相对标准差为:

$$CV(1/E_{eq}) = \frac{\sigma(\overline{1/E_{eq}})}{\overline{1/E_{eq}}} = \frac{\sigma/\sqrt{n}}{\mu} = \frac{CV(1/E_{eq})}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$CV(1/E_{eq})$ 是柔量均值的相对标准差,用以描述样本整体精度。如图 6 所示,将不同尺度试验得到的柔量相对标准差绘制成散点图,采用幂函数拟合,得到柔量相对标准差与尺寸的关系如下:

$$CV(1/E_{eq}) = \frac{2.97\%}{l^{1.28}} \quad (3)$$

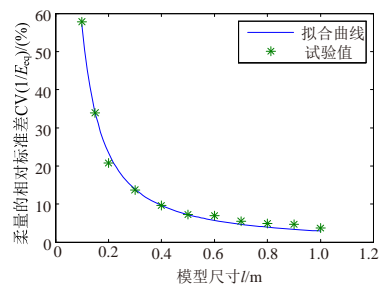


图 6 $1/E_{eq}$ 的相对标准差与尺寸的关系曲线

Fig.6 CV of $1/E_{eq}$ correlated with sample length

由图 6 可知,当尺寸较小时,拟合结果与数值试验结果较为一致,而此处试验次数的研究对象主要为小尺寸试样,拟合结果满足研究要求;当尺寸大于 0.5m 时,拟合结果较数值试验结果略偏小。

综合式(2)、式(3), 可以得到:

$$n = \left(\frac{2.97\%}{CV(1/E_{eq})} \right)^2 I^{-2.56} \quad (4)$$

为准确预测节理岩体的柔量, 可以采用不同尺寸的试样使得试验统计结果达到所需的精度, 对于本文的二维节理岩体, 为满足整体精度要求, 所需试验次数与试验尺寸的 2.56 次方成反比, 数值上大于其尺寸发生变化的空间维数值。一个大尺寸试样可分成多个小尺寸试样的个数与尺寸发生变化的空间维数值成正比。结合以上结论可推知: 一个大试样单独试验的结果优于将其分成多个小尺寸试样的试验结果的均值。结论可推广至三维节理岩体, 其适用范围限于本文岩体模型, 即均匀应力边界条件下的贯通节理岩体。而其是否严格成立, 尚需相应数值试验、室内和现场试验等的验证。

2.3 统计结果可靠性论证

本文进行了大量的数值试验, 结合式(2)和图 6, 可以得到本文足量试验次数对应柔量平均值的相对标准差如表 2 最后一列所示, 每个值均小于 1%, 证实了本文采用的试验次数足够多, 统计结果可靠。

3 结论适用性探讨

等效弹性模量的选取在复合材料力学中已有系统研究, Voigt假设复合材料的各组分中的应变是相等的, 将各组分的弹性模量加权平均得到了复合材料等效弹性模量的上限, 如图7(a)和式(5)所示; Reuss假设则认为复合材料内的应力是均匀的, 基于柔量得到了复合材料等效弹性模量的下限, 如图7(b)和式(6)所示。

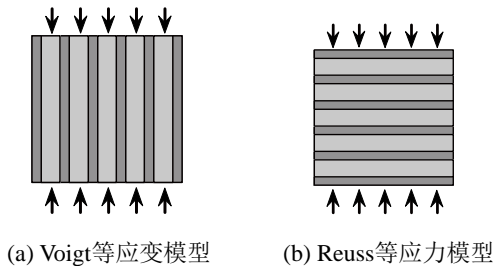


图 7 Voigt-Reuss 边界

Fig.7 Voigt-Reuss Bounds

对于Voigt等应变模型有:

$$\hat{E} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} = \frac{\sum f_i \sigma_i}{\hat{\varepsilon}} = \frac{\sum f_i (\hat{\varepsilon} E_i)}{\hat{\varepsilon}} = \sum f_i E_i \quad (5)$$

对于 Reuss 等应力模型有:

$$\hat{E} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sum f_i \varepsilon_i} = \frac{\hat{\sigma}}{\sum f_i \frac{\hat{\sigma}}{E_i}} = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{E_i}} \quad (6)$$

其中: \hat{E} 、 $\hat{\sigma}$ 、 $\hat{\varepsilon}$ 分别表示复合材料的等效弹性模量、等效应力和等效应变; f_i 为第 i 个组分所占的体积百分比。

工程上往往取样本平均弹性/变形模量估算其整体等效模量, 完整性高、岩性好的样本(试验点)具有相当高的弹性模量, 在这种统计方法中占主导因素, 得到的结果偏大, 对应于复合材料力学中等效模量的上限(Voigt bound); 而采用样本柔量的均值间接估算弹性模量, 完整性低、岩性差的样本具有相当高的柔量, 在这种统计方法中占主导因素, 得到的结果偏安全, 对应于复合材料力学中等效模量的下限(Reuss bound)。如果将 Voigt-Reuss 等效模量估算方法推广到岩体材料, 可以得到如下推论:

1) 在岩体内部应变均匀的情况下, 宜直接取样本平均弹性/变形模量估算其整体等效模量; 2) 在岩体内部应力均匀的情况下, 宜采用样本柔量的均值间接估算弹性模量。本文离散元数值试验岩体采用贯通节理(非贯通节理尖端容易出现应力集中现象), 边界条件采用应力控制型边界条件, 使得岩体内应力分布相对均匀, 数值试验结果显示采用柔量间接估算弹性模量更为准确, 验证了推论 2) 的合理性。现实中的岩体节理并非完全贯通, 边界条件复杂, 如何准确估算整体等效弹性模量, 有待进一步研究和探讨。

4 工程应用

白鹤滩水电站位于金沙江下游攀枝花至宜宾河段, 坝址左岸属四川省宁南县跑马乡, 坝址右岸属云南省巧家县大寨乡, 是我国继三峡、溪洛渡之后开展前期工作的又一座千万千瓦级水电站。坝址区部分玄武岩层柱状节理发育(如图 8), 其变形特征等研究对评价建基岩体质量、确定合理开挖深度具有重要意义。柱状节理 III₁ 类岩体柱体不规则, 长度一般 1m~5m, 柱体直径 13m~25cm, 典型截面如图 9 所示, 以不规则五边形和四边形为主, 柱面平直粗糙, 与图 3 对比可知: 柱面形态与 Voronoi 多边形甚为相近。宁宇等计算得到柱状节理岩体 REV 尺度为 3.0m×3.0m^[3]。表 3 为白鹤滩水电站左岸 III₁ 类柱状节理岩体的水平向承压板试验成果, 承压板直径为 50.5cm, 远小于 REV 尺度, 样本等效弹性

模量值离散度大,宜综合考虑上述两种方法估算整体等效弹性模量。



图8 白鹤滩水电站坝址区柱状节理岩体图

Fig.8 Columnar jointed rock masses at the dam site of Baihetan Hydropower Station

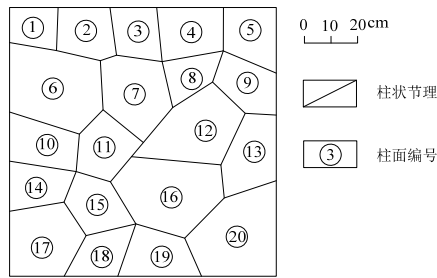


图9 柱状节理岩体断面素描图

Fig.9 Cross-section sketch drawing of columnar jointed rock masses

采用传统方法估算岩体整体等效弹性模量:

$$\overline{E_{eq}} = 21.9\text{GPa} \quad (7)$$

以“均值±标准差”的形式估算整体等效弹性模量取值范围,则:

$$(\overline{E_{eq}} - \sigma(\overline{E_{eq}}) \sim \overline{E_{eq}} + \sigma(\overline{E_{eq}})) = (18.7 \sim 25.0)\text{GPa} \quad (8)$$

基于样本柔量估算岩体整体等效弹性模量:

$$1/\overline{1/E_{eq}} = 18.7\text{GPa} \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{\overline{1/E_{eq}} + \sigma(1/E_{eq})} \sim \frac{1}{\overline{1/E_{eq}} - \sigma(1/E_{eq})} \right) = (16.6 \sim 21.4)\text{GPa} \quad (10)$$

类似于 Voigt-Reuss 边界理论,由式(7)、式(9)得到该类岩体整体等效弹性模量的参考取值范围为 18.7GPa~21.9GPa,若考虑统计结果本身的误差,由式(8)、式(10)得到扩大的取值范围为 16.6GPa~25.0GPa。

表3 白鹤滩水电站左岸 III₁类柱状节理岩体的水平向承压板试验成果

Table 3 Statistics of equivalent continuum elastic moduli based on horizontal bearing plate test of III₁ class columnar jointed rocks on left bank of the Baihetan Hydropower Station

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
等效弹性模量/GPa	35.8	29.2	13.7	15.6	15.1	35.0	13.5	13.5	25.3

5 结论

本文采用离散元数值试验,充分考虑岩体中节理和完整岩石的相互影响以及节理的随机性,得到应力控制型单轴压缩边界条件下的贯通 Voronoi 随机节理岩体变形尺寸效应特性如下:

(1) 在本文给定参数下,相对标准差 CV 值为 10%对应的变形 REV 尺寸约为 $2l_{vor}$, CV 值为 5%对应的变形 REV 尺寸约为 $4l_{vor}$ 。

(2) 在 REV 尺度内,等效弹性模量的均值 $\overline{E_{eq}}$ 随着尺寸的增大显著降低;而柔量的均值 $\overline{1/E_{eq}}$ 随尺寸变化很小。采用 $1/\overline{1/E_{eq}}$ 间接估算岩体整体等效弹性模量明显优于 $\overline{E_{eq}}$ 估算。

(3) 为获得节理岩体的整体柔量,既可以通过少量的大尺寸试验,也可以通过大量的小尺寸试验,为满足指定精度要求,所需试验次数与尺寸呈负的幂函数关系。对于本文的二维节理岩体,所需试验次数与试验尺寸的 2.56 次方成反比,数值上大于其尺寸发生变化的空间维数。

与 Voigt-Reuss 边界理论对比分析知:结论(2)适用于岩体内部应力均匀的情况。现实中的岩体节理并非完全贯通,边界条件复杂,结论(2)不完全正确但仍具参考价值。实际工程中多采用样本 $\overline{E_{eq}}$ 估算岩体的整体等效弹性模量,结果偏于乐观,本文建议同时采用 $1/\overline{1/E_{eq}}$ 间接估算岩体的整体等效弹性模量的下限。

参考文献:

[1] Hudson J A, Harrison J P. Engineering rock mechanics - an introduction to the principles [M]. Oxford: Elsevier, 2000: 54-56.

[2] Oda M A. Method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 5(3): 281-287.

[3] 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 Weiya, Zheng Wentang, 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)

[4] Min K B, Jing L R. 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.
- [5] Esmaili K, Hadjigeorgiou J, Grenon M. Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(6): 915—926.
- [6] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体各向异性特性及尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1405—1414.
Zhu Daojian, Yang Linde, Cai Yongchang. Research on anisotropic characteristics and size effect of columnar jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1405—1414. (in Chinese)
- [7] Kanit T, Forest S, Galliet I, Mounoury V, Jeulin D. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(13/14): 3647—3679.
- [8] 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 Huoming, Sheng Qian, Wu Aiqing. Size effect analysis of macro-mechanics parameters for the rock masses of TGP shiplock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 661—664. (in Chinese)
- [9] Yoshinaka R, Osada M, Park H, et al. Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect [J]. Engineering Geology, 2008, 96(3/4): 173—186.
- [10] 孙广忠, 周瑞光. 岩体变形和破坏的结构效应[J]. 地质科学, 1980, 15(4): 368—376.
Sun Guangzhong, Zhou Ruiguang. The structural effect of rock mass deformation and failure [J]. Chinese Journal of Geology, 1980, 15(4): 368—376. (in Chinese)
- [11] Hudson J A. 岩石力学原理[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(3): 252—268.
Hudson J A. Rock mechanics theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989, 8(3): 252—268. (in Chinese)
- [12] Barton N. Scale effects or sampling bias [J]. Publikasjon - Norges Geotekniske Institutt, 1991, 182(1): 31—55.
- [13] 周培德. 计算几何-算法设计与分析 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 88.
Zhou Peide. Computational Geometry—Algorithm Design and Analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 88. (in Chinese)
- [14] 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 Shengqi, Su Chengdong, Xu Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112—118. (in Chinese)
- [15] 王娟, 李庆斌, 卿龙邦, 管俊峰. 基于细观结构统计特征的混凝土几何代表体尺寸研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 1—6.
Wang Juan, Li Qingbin, Qing Longbang, Guan Junfeng. Studies on representative volume element size of concrete based on meso-structure statistics [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 1—6. (in Chinese)
- [16] 康锦霞, 王志华, 赵隆茂. 采用 Voronoi 模型研究多孔金属材料准静态力学特性[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 203—209.
Kang Jinxia, Wang Zhihua, Zhao Longmao. Study on the quasi-static mechanical properties of Cellular metal using voronoi tessellation [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 203—209. (in Chinese)
- [17] 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 Wentang. Rock mechanics of irregular columnar jointed basaltic mass and its application in high slope and dam foundation [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [18] 宁宇. 柱状节理岩体各向异性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)
- [19] Bieniawski Z T, Bernede M J. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 138—140.