

裂隙岩体表征单元体的确定及工程应用*

陈云娟¹,朱维申²,王知深²,李邦翔²,郑春梅³

(1. 山东建筑大学 建筑结构鉴定加固与改造山东省重点实验室,济南 250101;2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心,济南 250061;3. 鲁东大学 土木工程学院,山东 烟台 264025)

摘 要:以某水电站为工程背景,介绍了两种确定裂隙岩体 REV 的新方法:数字图像处理法和非连续变形 DDARF 法。依据水电站岩性差异、风化及卸荷程度,将围岩划分为若干工程地质区段并建立随机裂隙网络模型,研究尺寸效应对岩体力学参数的影响规律,获得了 REV 表征尺寸和等效力学参数;得到岩体的非线性强度准则,嵌入 FLAC^{3D}对水电站开挖进行模拟,并监测关键点位移。结果表明:水电站围岩的抗压强度与围压成正相关;洞室开挖对厂房上下游中部和拐角处影响较大,应加强对这些部位的支护;关键点的位移数值结果与现场监测值基本吻合,误差小于 5%。数字图像处理法和 DDARF 法为裂隙岩体 REV 的确定开拓了新思路,对复杂条件下地下洞室围岩的稳定性分析有广泛的应用前景。

关键词:裂隙岩体;DDARF;REV;数字图像处理;非线性强度准则;水电站

中图分类号:TU452 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2016)01-0025-05

Determination of Representative Elementary Volume of Fractured Rock Mass and Its Engineering Application

Chen Yunjuan¹, Zhu Weishen², Wang Zhishen², Li Bangxiang², Zheng Chunmei³

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Appraisal and Retrofitting in Building Structures, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, P. R. China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, P. R. China)

Abstract: With the engineering background of a hydropower station, two new methods to determine the REV of fractured rock masses are introduced: Digital Image Processing method and discontinuous deformation method DDARF. The hydropower station's surrounding rock masses are divided into several engineering geological sections based on lithologic differences, weathering and unloading degrees, and a stochastic fractured network model is established, the mechanical parameters' response law of rock masses with different sizes is studied, the REV size of rock masses and equivalent mechanical parameters are obtained; The nonlinear strength criterion of rock masses is set up, with the criterion nested into FLAC^{3D}, excavation of hydropower station is simulated, and the displacements of key points are monitored. Results show that the surrounding rock masses' compressive strength of hydropower station has a positive correlation with confining pressure; the excavation of cavern has large effect on this cavern's corners and the centres of upstream and downstream, these parts should be strengthen and supported; numerical results and monitoring values of key points' displacements are in line, with the error less than 5%. The Digital Image Processing meth-

* 收稿日期:2015-04-03(修改稿)
作者简介:陈云娟(1984-),女,山东临朐人,博士生,主要从事大型地下工程施工过程力学和稳定性研究工作。
E-mail:skdeyj@126.com
通讯作者:朱维申(1932-),男,浙江绍兴人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与工程的教学及研究工作。
E-mail:zhuw@sdu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(51278287);教育部创新团队发展计划(IRT13075);山东省自然科学基金(ZR2011EL049)

od and DDARF method open up a new way of determining fractured rock masses' REV, which have a broad application prospect for analyzing underground surrounding rock masses' stability under complex conditions.

Keywords: fractured rock mass; DDARF; REV; Digital Image Processing; nonlinear strength criterion; hydro-power station

1 引言

裂隙岩体的物理力学特性随岩块尺寸的变化而变化,当达某一值时,岩体各项力学参数渐趋稳定,裂隙岩体表征单元体的研究能很好地解决贯穿于岩体工程勘测、试验、设计及施工过程中的力学模型选取与力学参数取值这两个问题。

REV最早是由 Bear^[1]在研究土体渗流时提出的,之后,国内外部分学者开始将 REV 的思想应用到岩体的研究中,如图1所示。Wilson等^[2]在研究节理岩体渗流时,探讨了岩体中的 REV 现象并分析了等效渗透张量的有关问题。Oda^[3]采用新的张量表达式分析了几何尺寸对岩体渗透特性的作用,在 REV 的基础上建立了渗透方程。Shlomo^[4]采用了现场实测法确定了岩体 REV。周创兵^[5]借助统计学理论提出了确定节理岩体 REV 的方法。Kulatilake^[6]采用数值方法来分析岩体单元表征体,主要采用的是有限元的方法,同时为其他方法的应用提供了思路。Ki bok等^[7]在 DEM 方法的基础上对节理岩体表征单元体进行了分析。前人^[8-12]对岩体 REV 的研究手段主要有:能量叠加法、地质统计法、解析分析法和数值模拟法。能量叠加法主要将研究对象限定在弹性阶段,与真实岩体相差较大。地质统计法没有分析不连续面间的胶结结构,影响了节理岩体的力学性质和 REV 尺寸。解析法的缺陷在于其研究对象分布简单、规整,对于真实岩体中不连续面的随机分布,很难进行描述。数值方法可以巧妙的对岩块或不连续面进行假定,设定其特有的本构关系或作用特性,对不连续面或岩块的应力应变关系进行数值模拟,因此,数值分析在岩体表征单元体研究中成为趋势。

本文以某水电站为工程背景,在原有数值分析手段的基础上引入了非连续变形分析方法 DDARF^[13],该方法的基本框架是 DDA,并介绍了分析裂隙岩体 REV 尺寸更为方便准确的数字图像处理办法。根据现场大量结构面的精细测量,归纳了优势节理组的分布特征,确定了水电站围岩表征单元体的存在性以及岩体等效力学参数,建立了满足 REV 尺寸的非线性强度准则,通过模拟试验和现场监测的对比,验证了方法对裂隙岩体工程的可行性和合理性。

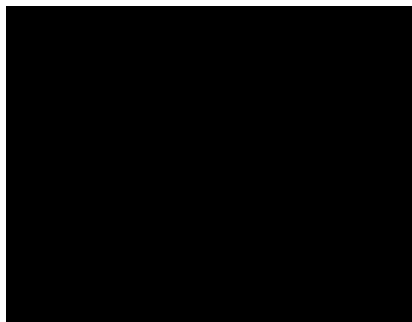


图1 岩体表征单元体 (REV) 概念

Fig.1 The concept of rock masses' representative elementary volume

2 工程概况

2.1 地质概况

某电站水库正常蓄水位为 2 078.00 m,总库容为 2.181 亿方,具有日调节水性能,装机容量 720 MW。根据《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》(DL5180—2003),确定本工程等别为二等工程,工程规模为大(2)型。

地下厂房上覆岩体厚度为 98~297 m,近河侧最小岩体水平厚度为 89 m。围岩主要为石英岩和大理岩。岩层产状为 NW355°-NE5°NE/SE∠45°~73°,岩层因受力挤压而弯曲延伸,产状变化较大,岩层走向与厂房轴线大角度相交。围岩区内发育 f_1 、 f_4 等断层,断层最大宽度为 0.6 m,大理岩蚀变带宽 8~10 m,推测其不会进入厂房。坝址区节理裂隙较发育,左岸局部发育有缓倾角裂隙,但其在岩体内发育条数较少,裂隙间距较大,多闭合,且延伸较短。综合分析地下厂房区的工程地质条件,大部分洞室围岩基本稳定,具备修建大跨度地下洞室的条件,局部稳定性差或不稳定的部位需加强支护处理措施。

2.2 工程地质分区

岩体表征单元体尺寸的确定与不连续面的几何、物理力学特性相关,同时也受岩块的性质影响,分析时一般需要先先将工程划分为几个区域,每个区域的岩体特性大致相同,求解每个区域 REV 之后,再总体分析整个工程区域,分区时主要考虑不连续面的分布以及所研究对象的特点。地下厂房总体围岩地质条件较好,石英岩和大理岩岩体裂隙不发育,岩体较完整,洞室围岩以Ⅲ₁类为主,局部为Ⅱ类,围

岩基本稳定,局部断层破碎带为Ⅳ类,为不稳定岩体。对该工程厂房有主要影响的结构面有6条,分别为断层 $f_1, f_3, f_4, f_8, f_{17}$ 和蚀变带,其中断层 f_8 通过尾水调压室,通过简化后的岩体分区如图2所示。



图2 水电站围岩地质分区

Fig.2 Geological division of hydropower station's surrounding rock mass

2.3 优势节理组及其分布规律

数值分析时,仅考虑水电站工程中倾角较大的随机节理组对洞室群围岩稳定性的影响,节理几何特性见表1。

表1 随机节理几何特性

Table 1 Random joints' geo-characteristics

节理组号	视倾角/(°)			迹长/m		间距/m	
	分布	均值	标准差	分布	均值	分布	均值
1	正态分布	66.98	0.5	负指数分布	1.5	负指数分布	1.3
2	正态分布	-70.69	1	负指数分布	1.2	负指数分布	1.8

3 确定岩体的 REV 尺寸及参数

3.1 数字图像处理法

数字图像处理(Digital Image Processing)又称为计算机图像处理,将图像信号转换成数字信号并利用计算机对其进行处理的过程,可以将岩体不连续面几何信息更换为数学信息。利用数字图像处理法首先需要对研究区域进行选择,拍摄区要平整,不存在凸起和凹陷,否则会产生阴影,同时要清理岩体表面的杂物以及裂隙的充填物,以免对影像造成干扰^[14]。

按经验分别拍摄边长为4、5、6、7、8、9和10 m的正方形裂隙岩体图像,将照片经过Photoshop软

件处理后转化成灰度图片,设定适当的灰度罚值,大于该值者为岩体不连续面,小于该值者为岩块,利用公式(1)计算节理岩体的不连续面比率为:

ξ = n / N (1)

式中:ξ表示节理岩体的不连续面比率;n表示岩体不连续面的像素个数;N表示岩体总的像素个数。

绘制岩体不连续面比率随试件尺寸变化的曲线关系,当变化率趋于稳定时,对应的试件尺寸便认为是岩体的REV尺寸。

3.2 非连续变形分析 DDARF 法

基于Monte-carlo原理,利用非连续变形分析方法DDARF生成随机节理网络模型,建立与数字图像处理法对应的边长为4、5、6、7、8、9和10 m的正方形含有随机节理的裂隙网络模型,对模型进行二维加载来获取洞室岩体的表征单元体尺寸。通过室内、现场试验获得各风化带内岩块力学参数及各卸荷带内结构面力学参数,如表2所示。限于篇幅,本文仅以Ⅲ₁类围岩为例进行分析。生成的部分随机节理网络模型如图3所示。

表2 水电站各分区数值试验参数

Table 2 Numerical experiment parameters of each division

风化特征	全风化	强风化	弱风化上段		弱风化下级		微新
	卸荷特征	强	强	弱	强	弱	
工程岩体分类		V	IV	IV	Ⅲ ₁	Ⅲ ₁	Ⅱ
岩块参数	c/MPa	2.1		5.1		5.9	11.9
	φ/(°)	55.00		55.57		55.68	56.42
	E/GPa	6.51		20.9		24.0	38.7
结构面参数	c/MPa	0	0	0.15	0	0.16	0.2
	φ/(°)	26.6	26.6	36.8	26.6	36.8	44.4

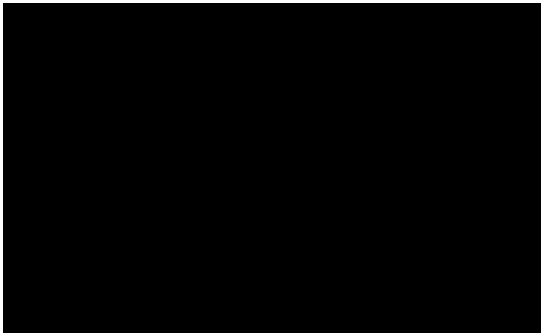


图3 不同尺寸的 DDARF 计算模型

Fig.3 DDARF calculation model of different sizes

针对围压0、10、15 MPa的压缩试验等工况对

模型进行压缩加载模拟,获得的岩体强度极限与二维试件尺寸的关系如图 4 所示。

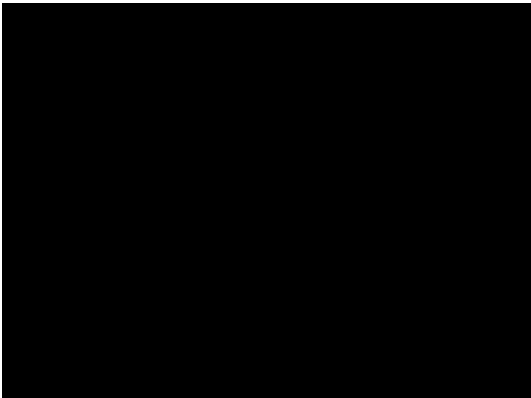


图 4 岩体轴向抗压强度与模型边长的关系曲线
Fig.4 Curve of uniaxial compressive strength and model's size

由图 4 可知,裂隙岩体的轴向抗压强度与围压成正相关,围岩的轴向抗压强度与模型边长的关系在三种围压下总体趋势类似,随着尺寸的加大强度逐步降低,当模型边长达到 8 m 后,抗压强度趋于稳定,因此,地下洞室的表征单元体尺寸为 8 m,即满足模型尺寸大于 8 m 时所获得的参数可用连续介质力学的方法分析计算,根据图 4 模型边长大于 8 m 时所得裂隙岩体的单轴等效抗压强度为 40 MPa,围压为 10 MPa 时的岩体等效抗压强度为 70 MPa,围压为 15 MPa 时的岩体等效抗压强度为 85 MPa。

根据四种工况下所求出的模型轴向峰值强度和侧压强度,绘制裂隙岩体的库伦摩尔圆如图 5 所示。

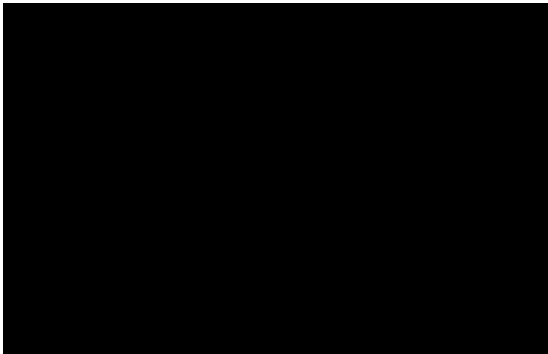


图 5 岩体的摩尔包络线强度准则
Fig.5 Mohr envelope strength criterion of rock mass

将摩尔包络线在 Origin 软件中进行拟合,得到裂隙岩体的非线性强度准则:

$$\tau = 2.58 \times (-\sigma + 1.6)^{0.71} \tag{2}$$

4 厂房开挖及结果分析

按工程需要,水电站共分 7 步开挖,开挖过程对洞室上下游中点、顶板及拐角等关键点进行了位移监测,厂房分层开挖及关键点布置如图 6 所示。应用 FLAC^{3D} 软件对水电站厂房开挖进行数值模拟,并采用所得非线性摩尔包络线强度准则,见公式(2),代替 FLAC^{3D} 中原有摩尔线性强度准则,本构选用弹塑性本构关系,采用 interface 接触面单元模拟断层,物理力学参数如表 2 所示。建立的水电站全三维模型如图 7 所示,共划分 324 391 个单元,55 407 个节点。

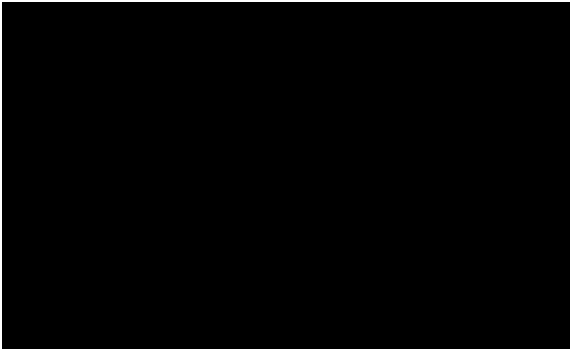


图 6 水电站分层开挖及关键点布置图
Fig.6 Layered excavation and key points' arrangements of hydropower station

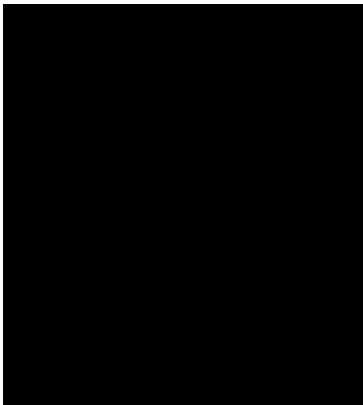


图 7 水电站全三维模型
Fig.7 Three-dimensional model of hydropower station

为验证方法的可行性和准确性,对 2#机组关键点位移的数值模拟结果与现场监测结果进行了对比,如图 8 所示。

由图 8 可知,洞室关键点位移值的数值模拟结果与现场监测结果基本吻合,误差在 5% 以内,说明该方法具有较高的准确度,对工程应用有一定的指导意义。同时,由关键点位移值可以看出,水电站厂房开挖对围岩位移影响较大的部位集中在厂房上下游中部和拐角处,拐角处容易产生应力集中

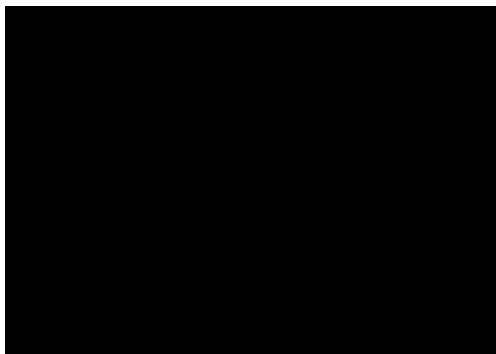


图8 关键点位移对比

Fig.8 Comparison of key points' displacements

现象,应加强对这些部位的支持。

5 结论

在前人研究裂隙岩体表征单元体的基础上,笔者又介绍了两种新方法:数字图像处理法和非连续变形分析 DDARF 法。

(1)结合某水电站为工程背景,分析水电站围岩 REV 尺寸,大于该 REV 尺寸时,可以采用等效连续力学对其进行研究。

(2)建立了水电站围岩的非线性摩尔包络线强度准则,并用于工程分析,通过监测关键点的位移,数值解与现场监测值误差小于 5%,验证了方法的可行性。

(3)水电站洞室开挖对厂房的上下游中部以及拐角处影响较大,产生较大的位移,因此,应对这些部位进行重点支持。

参考文献(References)

- [1] Bear J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: American Elsevier, 1972.
- [2] Wilson C R, Witherspoon P A. An investigation of laminar flow in fractured porous rocks[D]. University of California, Berkeley, California, 1970.
- [3] Oda M. Permeability tensor for discontinuous rock masses[J]. Geotechnique, 1985, 35(4): 483-495.
- [4] Shlomo P N. Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to the REV and fracture network concepts[A]//In: Proc. the 28th US Symposium of Rock Mechanics[C]. Tucson Belkema: University of Arizona, 1987: 533-561.
- [5] 周创兵. 裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1995. (Zhou Chuangbing. The coupling analysis research on fractured rock mass seepage field and stress field[D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric

Engineering, 1995.(in Chinese))

- [6] Kulatilake P H S W. Estimating elastic constants and strength of discontinuous rock[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1985, 111(7): 847-864.
- [7] Ki bok M, 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: 795-816.
- [8] 张贵科, 徐卫亚. 裂隙网络模拟与 REV 尺度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1675-1680. (Zhang Guike, Xu Weiya. Analysis of joint network simulation method and REV scale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1675-1680.(in Chinese))
- [9] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(Sun Guangzhong. Structural mechanics of rock mass [M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))
- [10] 周火明, 盛谦, 陈殊伟, 等. 层状复合岩体变形试验尺寸效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 289-292. (Zhou Huoming, Sheng Qian, Chen Shuwei, et al. Numerical simulation on size-effect in deformation test of layer composite rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 289-292.(in Chinese)).
- [11] 张莉丽, 张辛, 王云, 等. 非常低延展性裂隙岩体 REV 存在性研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(5): 20-24. (Zhang Lili, Zhang Xin, Wang Yun, et al. Determining of the REV for fracture rock mass of very low ductility[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 20-24.(in Chinese))
- [12] 张红亮, 王水林, 李春光. 基于数值试验的节理岩体变形特性 REV 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3643-3648. (Zhang Hongliang, Wang Shuilin, Li Chunguang. Research on representative elemental volume (REV) of deformation character of jointed rock mass based on numerical experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3643-3648.(in Chinese))
- [13] 焦玉勇, 张秀丽, 李廷春. 模拟节理岩体破坏全过程的 DDARF 方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (Jiao Yuyong, Zhang Xiuli, Li Tingchun. DDARF method for simulation on whole process of jointed rock masses' failure [M]. Beijing: Science Press, 2010.(in Chinese))
- [14] 冯迪, 陈尚星, 陈昊海. 土体的裂隙描述和表征单元体积研究[J]. 福建建筑, 2012(4): 102-104. (Feng Di, Chen Shangxing, Chen Haohai. Research on cracks description and representative elementary volume of soil [J]. Fujian Architecture & Construction, 2012(4): 102-104.(in Chinese))