

张杨, 宁立波, 尹峰, 等. 2020. 岩体体裂隙率野外测量及计算方法的研究[J]. 工程地质学报, 28(1): 10-18. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-387

Zhang Yang, Ning Libo, Yin Feng, et al. 2020. New method of field measurement and calculation for volumetric fracture rate of rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 28(1): 10-18. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-387

岩体体裂隙率野外测量及计算方法的研究^{*}

张 杨^① 宁立波^① 尹 峰^② 赵国红^② 白冰珂^① 朱晓亭^①

(^①中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074, 中国)

(^②安徽省国土厅公益性地质调查管理中心, 合肥 230088, 中国)

摘 要 裂隙率作为表征岩体裂隙特征的一项重要参数,有线裂隙率、面裂隙率、体裂隙率 3 种表征方法。目前常用测线法、统计窗法获取线、面裂隙率仅能从一维或二维反映裂隙发育情况,其方法还存在测量结果随机性、应用受露头条件所限等不足;现有体裂隙率测量方法也存在着实际应用性较差、成本高等问题,尚缺乏简便易操作的野外测量方法。为此本文提出了一种新的野外测量岩体体裂隙率的工作方法——球体法。由于构造、成岩裂隙发育的组系性、方向性,球体法根据各组裂隙产状从不同方向进行观测,通过多次测量统计岩体出露面上裂隙的发育特征,推断岩体内部裂隙的发育状况,其值能更好地反映局部区域岩体内部裂隙发育程度。此外,在测量时利用专利仪器可以得到沿裂隙面法线方向上隙宽以及隙间距数据真实值,测量条件对出露面平整情况要求不高,测量结果受露头平整性影响不大,具有更好的实用性。本文以安庆大龙山采石场研究区为例应用球体法,野外现场测量表明该方法可以在较为方便操作的基础上实现快速测量;研究区体裂隙率均值为 2.286%,集中分布在 1%~4%,结合研究区实际情况以及误差分析结果,球体法可以很好地反映研究区各个测量点的裂隙发育程度。

关键词 体裂隙率;球体法;野外测量;大龙山

中图分类号: TU459⁺.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.13544/j.cnki.jeg.2018-387

NEW METHOD OF FIELD MEASUREMENT AND CALCULATION FOR VOLUMETRIC FRACTURE RATE OF ROCK MASS

ZHANG Yang^① NING Libo^① YIN Feng^② ZHAO Guohong^② BAI Bingke^① ZHU Xianting^①

(^①School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

(^②Public Welfare Geological Survey Management Center of Anhui, Hefei 230088, China)

Abstract As an important parameter to characterize the fracture characteristics of rock mass, we characterize the fracture rate from the linear, surface and volumetric perspective. However, the available linear measurement method and statistical window method, which obtain the linear and surface fracture rate from 1-D or 2-D perspective, have the disadvantages of randomness of measurement results and limited application conditions. And the existing method of volumetric fracture rate also has some problems such as poor practical application and high cost. There is still a lack of easy-to-operate method to measure the rate of fissures in the field. Therefore, a new sphere method is proposed to measure volumetric fracture rate of rock mass in the field. Due to the unique tectonic

* 收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-12-13.

基金项目: 国家自然科学基金(资助号: 41572212), 安徽省国土资源厅科技项目(资助号: KZ16Z523).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41572212) and the Technology Project of Department of Natural Resources of Anhui Province(Grant No. KZ16Z523).

第一作者简介: 张杨(1992-), 男, 硕士生, 主要从事水文地质、环境地质等方面的研究.E-mail: 931372325@qq.com

通讯作者简介: 宁立波(1966-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文地质、环境地质等方面的教学和科研工作.E-mail: ninglibo200294@163.com

and statistical regularity of the structure and diagenetic fissures, the sphere method observes each group of fracture occurrences from different directions. The development of the rock mass can be statistically inferred by measuring the developmental characteristics of each group of cracks on the limited exposed surface of rock mass. And its value can better reflect the development degree of the internal crack of the local rock mass. In addition, the spherical method can obtain the true value of the gap width and the gap spacing data along the normal direction of the fracture surface by using the patented instrument at the field. And the flatness of the exposed surface of the rock mass affect the measurement result hardly. Taking Dalongshan quarry in Anqing as the study area, field measurements of spheroid method show that the average volumetric fracture rate is 2.286% and the overall difference is concentrated in 1%~4%. The method can realize rapid measurement on the basis of more convenient operation in the field. Combining the actual situation of the study area and the results of error analysis, the sphere method can reflect the degree of fracture development at each measurement point in the study area.

Key words Volumetric fracture rate; Sphere method; Field measurement; Dalong mountain

0 引言

岩体裂隙是指固结的坚硬岩石(沉积岩、岩浆岩、变质岩)在各种应力作用下破裂变形而产生的空隙(王大纯等, 1995)。裂隙率作为反映岩体裂隙发育程度的重要定量指标,在实际生产工作中主要涉及水利水电工程(梁杏等, 2006)、采矿工程、地质勘探(蔡永庆等, 2001)、岩土工程(马淑芝等, 2002)、岩质边坡覆绿(袁磊等, 2017)等专业工程项目。

岩体中发育的裂隙面具有空间组合复杂性、随机性、形态多样性等特点,由于现有测量技术手段所限,难以对岩体中真实结构面进行精确描述。目前主要测量方法是通过钻孔、坑道开挖面或岩石露头进行人工测量,在工程实践中常使用测线法和统计窗法(倪春中等, 2013)。测线法通过在岩体露头布设一条垂直于最发育裂隙的测线直线,测量与测线相交裂隙的几何参数(Priest et al., 1981),其测量的是裂隙一维密度,结果表征的是与裂隙走向垂直方向上单位长度内裂隙所占比例,即线裂隙率(李亚伟等, 2014)。统计窗法通过在裂隙较为发育的露头选择合适位置布置矩形或圆形统计窗口,测量与该窗口呈包含、相切、相交关系的所有裂隙面几何参数(Zhang et al., 1998),其测量的是裂隙二维密度,结果表征的是单位面积岩体露头面所包含裂隙面积的比例,即面裂隙率。

但测线法和统计窗法存在以下问题:(1)两种测量方法只能从一维或二维角度反映岩体局部表面裂隙发育情况,无法体现岩体内部裂隙发育情况,很可能会遗漏一些关键裂隙信息;(2)只有当裂隙面与出露面正交时,所测隙宽(视隙宽)才等于裂隙真

隙宽。在野外裂隙面大多与出露面斜交,隙宽测量值较真实值偏大(图1),随着隙宽增大会产生较大误差;(3)测量结果具有较大随机性,选取不同位置、不同大小的测线或统计窗会对得到不同的测量结果;(4)野外岩体出露面多不平整,受出露条件和可操作性所限,布设测线或统计窗较为困难,应用受到极大限制。

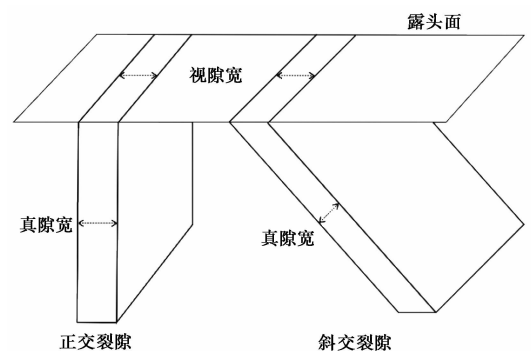


图1 正交裂隙、斜交裂隙测量真隙宽与视隙宽的区别

Fig. 1 The distinctions between true-gap-width and pseudo-gap-width of fractures which are orthogonal or oblique to an outcrop plane

体裂隙率是指岩石中裂隙的体积与包括裂隙在内的岩石体积之比,可以定量表征岩体内部裂隙的发育程度。但受岩体裂隙发育的复杂性、野外出露条件以及现有技术水平所限,裂隙三维密度是一个难以测定的参数,目前常用的测定手段主要有钻孔法(魏翔等, 2015)、三维网络模拟技术(邬爱清等, 1998; 宋晓晨等, 2004)、基于数字图像解译处理的数码摄影裂隙测量法(范留明等, 2005)等。

钻探法在钻探过程中会扰动岩体,改变原有裂隙结构,测量结果不够真实客观;测量时测量值仅能反映钻孔附近的裂隙发育情况,不同钻孔位置得

到测量结果差异较大,存在很大的随机性。而基于现场调查统计裂隙面参数进行的三维网络模拟技术或基于数字图像解译处理的数码摄影裂隙测量法,步骤繁复,所需技术要求和成本费用高,不利于工程实践应用。因此目前缺乏较为简便快捷的体裂隙率野外测量方法,为此本文提出了一种新的野外现场测定岩体体裂隙率的方法——球体法。

1 球体法测量原理

1.1 测量裂隙类型

岩体中常发育各种成因类型的裂隙,野外常见的有构造裂隙、成岩裂隙、风化裂隙、卸荷裂隙等,不同成因的裂隙其分布特征、发育规律都不同(张人权等, 2011)。构造裂隙是由于地壳发育构造力作用而在岩石中发育产生的裂隙,其空间分布受构造应力场控制,一般规模较大,可延伸至岩体深部。构造裂隙发育特征常表现出一定规律性,即在同一期构造地质应力作用下形成的裂隙往往具有一定组系性,同组裂隙的产状、规模、数量、密度及发育程度有很大相似性,这些特征是裂隙进行概率统计分析的基础(李亚萍, 2005)。而由于表生作用(风化、卸荷作用等),风化裂隙、卸荷裂隙等都是在特定应力条件下产生的,主要集中发育于岩体表面局部(陈德基等, 2000),较为破碎,不具有统计规律。

以往研究表明,岩体由表面向深部破碎程度逐渐变弱,裂隙率逐渐呈一个稳定值(韩爱果等, 2004)。考虑到各类裂隙在岩体空间中的发育特征,体裂隙率测量的裂隙类型为构造作用形成的构造裂隙、部分干缩张开未被填充的成岩裂隙。

野外识别裂隙是裂隙测量的前提和基础,依据构造裂隙发育的形态特征,归纳总结构造裂隙野外识别要点:(1)方向性:裂隙由于构造作用具有较为明显的方向性和延伸性;(2)组系性:在一定范围内同时存在多组裂隙互相交切形成空间裂隙网络;(3)切穿性:裂隙可沿裂隙面在不同组分的岩石中发育,切割不同年代和成分的岩层。

1.2 测量原理

在岩体内部一定范围往往发育有多组方向裂隙,同一组裂隙近似平行,各组裂隙互相交叉,构成岩体内空间裂隙网络。裂隙单元体是在一定范围内包含不同方向裂隙组交切在内的岩体空间集合,是

能够宏观反映测量点附近裂隙发育的小范围区域(潘欢迎等, 2006),岩体裂隙率会随着研究范围尺寸的增大而趋于稳定。我们将裂隙单元体定义为球体,选取合适半径,测量统计测量点区域内单元球体的裂隙率来代表测量点的体裂隙率。

以某一组裂隙(如 $L_0, L_1, L_2, \dots$ 所在裂隙面)为例,在测量点附近存在岩体出露面,可以从侧面对该组裂隙进行观测(图2)。选取其中一个较为平整的裂隙面作为基准面(面 AO_0C),同一组裂隙面近似平行,与单元球体交切于平行圆($L_1, L_2, \dots$),分别测定裂隙切面到基准面的距离($H_1, H_2, \dots$),利用几何关系计算切面半径($R_1, R_2, \dots$)。裂隙切面面积与对应隙宽($n_1, n_2, \dots$)的乘积近似计算裂隙面与单元球相交的体积,同理逐条计算求和得到该组裂隙与单元球交切的体积,进而可以计算该组裂隙面法向裂隙率。在测量点附近选取相邻基准面对该组裂隙多次测量,统计裂隙面法向体裂隙率均值表示该组裂隙沿面法线方向 $\vec{m}_1$ 的发育状况。

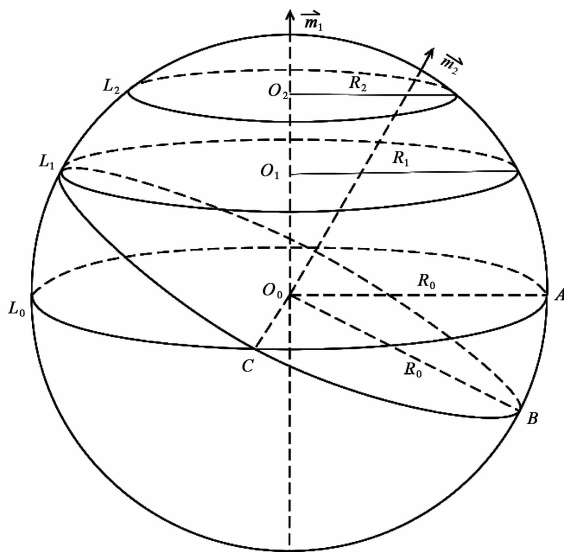


图2 三维球体裂隙率测量原理示意图

Fig. 2 The schematic diagram showing method of measurement in a 3-dimensional sphere

为测定三维空间中岩体的体裂隙率,需要根据各组裂隙产状从不同方向进行观测计算(如以面 BO_0C 为基准面从侧面观测,计算法向 $\vec{m}_2$ 裂隙率),将测量点发育的不同方向裂隙组在三维单元球中进行叠加得到测量点体裂隙率。

1.3 方法适用性

由于风化、卸荷裂隙主要发育于岩体表层,较为破碎,不具有统计规律,球体法测量的主要是岩体内

部三维空间中具有一定方向性和组系性的构造、成岩裂隙。通过测量统计岩体出露面上裂隙的发育特征,推断其在岩体内部的发育状况,其值能更好地反映局部区域岩体内部裂隙的发育程度,可以为评价裂隙岩层地下水储容能力、评价岩体质量提供理论依据,为实际工程设计以及边坡覆绿工程提供技术指导。

2 球体法测量计算方法

利用球体法测取岩体体裂隙率时,主要包括以下几个步骤:先期资料收集、野外地质踏勘、观测点数据测量及记录、室内计算统计体裂隙率。先期室内收集整理研究区的地质资料,通过该地区的地层岩性、构造等基础地质资料,大致了解区域内可能存在的构造裂隙及其分布特征。

2.1 野外地质踏勘

结合前期调查资料,对研究区开展实地调查,调查裂隙出露面情况,选定裂隙测量点;测量如裂隙间距、隙宽等参数,根据调查结果选取合适的测量半径。这些工作可与其他地质勘察工作一同进行。

2.1.1 选择测量点位置

测量工作可以在露天采掘场、浅井、地下开采坑道中进行,但并不是所有的岩体出露面都能观察测量裂隙,所选位置要有代表性,在兼顾、安全、便捷的同时能够测量足够详尽的结构面数据。根据野外岩体出露情况选定观测点,记录并编号。

2.1.2 选取测量球体半径

为在一定尺寸测量空间中测量统计岩体体裂隙率,需要保证测量范围内包含一定数量可测裂隙。野外裂隙间距大多在 10~100 cm,我们在选取测量球体半径时可根据前期勘察的裂隙发育间距以及裂隙出露、发育情况来进行选择。

出于在一定精度范围内减少野外测量工作量的考虑,我们总结以往工程实测经验,参考对不同裂隙岩体块体化程度的尺寸效应分析结果——裂隙岩体表征单元体尺寸为裂隙间距的 4~8 倍(夏露等, 2010),给出测量半径的选取建议:裂隙平均间距在 10~30 cm 间,测量半径选为 1 m;裂隙平均间距在 30~100 cm 间,测量半径选为 2 m;裂隙平均间距在 10 cm 以内,测量半径选为 0.5 m;若岩体裂隙平均间距大于 100 cm 或受野外测量条件所限,视具体情况选定合适大小测量半径。在实际测量时,可根据野外岩体裂隙露头情况以及工程实际测量精度需要

做相应调整。

2.1.3 测量点裂隙分组

野外勘测时采用远观近察对测量点裂隙进行分组。测量人员分小组在远处观察测量点裂隙延伸方向(延伸方向一致的可能为同一组构造裂隙,局部发育的可能为风化裂隙、卸荷裂隙等),初步归纳分组后大致确定裂隙发育组数。随后走近岩层,近距离观察各组裂隙发育特征,辨别其成因类型,用罗盘测量可能存在的构造裂隙产状。为便于野外操作,我们参考构造地质学中对裂隙的分组标准,结合测量结果将倾向相差不超过 30°且倾角相差 10°以内的节理面视为同一组。分析裂隙的倾角、倾向等测量结果,将产状相近的裂隙归为同一组。各小组就观察测量结果对比讨论,求同存异,对有分歧的裂隙组进行验证,最终统一确定裂隙分组情况,确保分组结果涵盖测量点附近所有构造裂隙。

2.2 野外数据测量

在测量某一组裂隙各项参数时,需要选择合适位置测量其隙距和隙宽。

隙距是指裂隙面沿其法线方向到基准面(裂隙面)的距离。尤其当裂隙与岩体出露面斜交时,真实隙距并不是出露面上裂隙缝之间的距离(图 3a),为此我们使用专利所设计的体裂隙率测量仪器进行测量(王忠伟等, 2018),测量仪器示意图如图 3b。在观测一组裂隙时,选取一个较平整、方便操作的裂隙面作为测量基准面,将仪器底座架在裂隙面上,利用罗盘可测得裂隙面产状,此时测尺方向即为裂隙面法线方向。沿测尺方向调节升降台,使激光笔对准出露面上的裂隙缝,读取刻度尺对应高度即为该条裂隙到基准面的隙距。

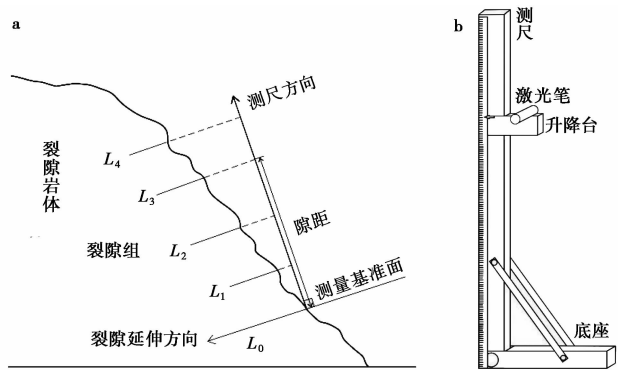


图 3 野外测量裂隙隙距以及仪器示意图
Fig. 3 The schematic diagram showing the instrument to measure gap width of fractures
a. 野外裂隙隙距测量示意图; b. 测量仪器

隙宽是描述裂隙开启性的指标,我们选用精密的塞尺进行测量:目测裂隙宽度,选择适当规格的塞尺塞入裂隙缝隙,恰能塞入的塞尺厚度即为裂隙的真隙宽。裂隙发育宽窄各异,本研究测量隙宽下限值为 0.1 mm。一是考虑到在野外测量时,塞尺厚度小于 0.1 mm 过于单薄,难以插入细窄的裂隙缝;二是由于隙宽小于 0.1 mm 的裂隙属于微裂隙(Press, 1966),延伸性较差,大多闭合或被填充。

由于裂隙在岩体中发育的非均一性,同一组裂隙在不同测量位置测得的裂隙间距、隙宽都不同。为减少裂隙发育导致的随机性误差,在一定范围内选定不同的测量基准面,同一方向多次测量,测量结果取均值来反映该组裂隙在测量点附近的发育状况。理论上随着测量次数的增加,所测裂隙参数均值愈加接近测量点附近裂隙真实情况,但在实际工作中出于野外工作量以及可操作性考虑,我们使用有限次测量所得到的平均值来估计真实值。结合实测经验,测量 4~7 次即可,测量基准面应尽可能接近。若测量点裂隙发育情况较复杂,可根据实际情况适当增加测量次数。

在测量空间中多组裂隙相互交切形成三维裂隙网络,各组裂隙产状表征了它们在空间中的相对位置,因此需要根据相应产状从不同方向进行观测,不同裂隙组的测量中心分布在测量点的不同位置。在确定测量范围时,根据裂隙分组结果及对应产状,结合出露面情况,尽可能使各组裂隙测量中心接近,即各个测量中心距主要测量中心 5 m 范围内为宜。

2.3 计算体裂隙率

根据以上方法测得区域内各测量点裂隙的几何

参数,具体的计算步骤如下:

(1) 某一测量点区域内存在有 m 组裂隙,根据裂隙发育间距选取合适测量半径 R ,以第 1 组裂隙为例,逐次测量第 1 组第 i 条($i=1, 2, 3\cdots n$)裂隙的隙宽 n_i 以及隙距 h_i ,可以利用单元球体中几何关系计算裂隙面与测量球体切取圆的半径(图 4a)。

$$R_i = \sqrt{R^2 - h_i^2} \quad (1)$$

由于球体弧度变化,裂隙面与单元球体交切形状为圆台状。发育裂隙隙宽多在 1~20 mm 左右,为便于计算,我们将相交圆台近似视为圆柱体,此时圆柱体的高即为裂隙隙宽(图 4b)。因此第 1 组第 i 条裂隙与测量球体相切的体积可近似计算为:

$$V_i = \pi n_i (R^2 - h_i^2) \quad (2)$$

(2) 将第 1 组每条裂隙与球体交切体积求和可以得到第 1 组裂隙在测量球体中所占的总体积。但受岩体出露条件所限,有时在野外较难找到大范围的岩体出露面,同时出于减少野外工作量、简化计算量的考虑,在计算时我们近似认为裂隙在上下半球中是对称发育的(图 4c)。

因此对称累加计算第 1 组裂隙在测量球体中所占的总体积为:

$$V_1 = \pi n_1 R^2 + \sum_{i=2}^n 2\pi n_i (R^2 - h_i^2) \quad (3)$$

多次测量统计取第 1 组裂隙与单位球体相交体积的均值 $\bar{V}_1$ 。同理分别计算第 j 组($1 \leq j \leq m$)裂隙在测量球体中所占的体积均值,累加求和和组裂隙与测量球体交切的总体积。

$$V_v = \sum_{j=1}^m \bar{V}_j = \bar{V}_1 + \cdots + \bar{V}_j + \cdots + \bar{V}_m \quad (4)$$

(3) 计算测量点体裂隙率为:

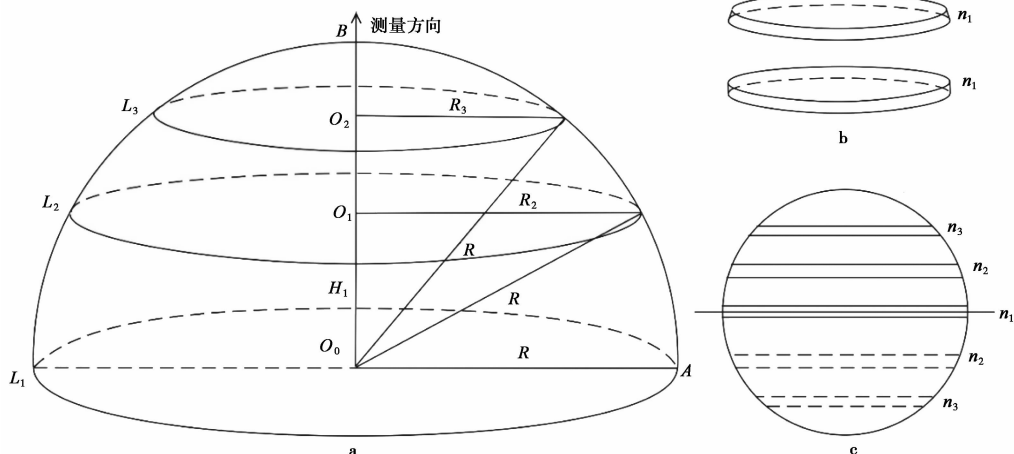


图 4 体裂隙率计算示意图

Fig. 4 The schematic diagram showing calculation method of volumetric fracture rate

$$K_v = \frac{V_v}{V_0} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{V}_j}{4/3\pi R^3} \times 100\%$$

(5)

3 应用实例

本文以安庆市大龙山集贤关研究区为例,应用球体法测量研究区内裂隙岩体体裂隙率,并对结果进行分析。

3.1 研究区概况

安庆大龙山集贤关研究区位于安庆市区北部,所属安庆市宜秀区,距安庆市区 10 km。测量区中心地理坐标 E 117°0′53″,N 30°35′35″;属江北低山丘陵区,区内整体西高东低,最高海拔标高+179.2 m,最低海拔+16.4 m;微地貌类型为高丘和岗地;测量区出露地层主要为三叠系下统南陵湖组(T_{1n})。

收集研究区附近地质资料,野外实地踏勘,在研究区 4 处宕口岩质边坡共布设 18 个体裂隙率测量点(图 5)。其中,1~3 号测量点在西 1 宕口,4~6 号测量点在西 2 宕口,7~15 号测量点在东 1 宕口,16~18 号测量点在西 3 宕口。

3.2 研究区体裂隙率测量及计算

根据前期裂隙调查结果,研究区裂隙平均隙间距小于 10 cm,选取测量半径为 0.5 m。野外利用仪器对裂隙隙距、隙宽等数据进行测量,共测量 82 组裂隙。1 号测量点位于西 1 宕口,实地观察存在 4 组裂隙,分别对每组裂隙进行多次测量,以 1 号测量

点为例说明如何进行计算。
(1)在测量点范围内对第 1 组裂隙进行了 4 次测量,因篇幅有限以第 1 次测量结果为例,计算第 1 次测量的裂隙体积 V₁₁(见表 1)。

表 1 No.1 号测量点第 1 组裂隙第 1 次测量体积计算表
Table 1 Table for calculation volume of the No.1 fractures at No.1 measurement point for the first time

测量次数	裂隙产状	裂隙编号	隙距 h _i /cm	隙宽 n _i /cm	裂隙切面体积 /cm ³ V _i = πn _i (R ² - h _i ²)	裂隙体积 /cm ³ V ₁ = πn ₁ R ² + ∑ _{i=2} ⁿ V _i
第 1 次	NE22° ∠43°	1	0.0	0.045	706.858	4140.874
		2	1.7	0.021	329.486	
		3	5.5	0.020	310.358	
		4	8.7	0.043	654.993	
		5	12.6	0.063	926.758	
		6	15.0	0.015	214.414	
		7	19.5	0.030	399.563	
		8	23.0	0.012	148.610	
		9	26.5	0.030	338.868	
		10	28.1	0.035	376.134	
		11	44.6	0.023	73.823	
		12	48.2	0.013	14.438	

(2)分别计算第 1 组裂隙 4 次测量结果并取均值 $\bar{V}_1 = \frac{V_{11} + V_{12} + V_{13} + V_{14}}{4}$ 。

同样方法计算其他 3 组裂隙在球体中的体积(计算结果见表 2),进而计算 1 号测量点裂隙与单元球交切的总体积。

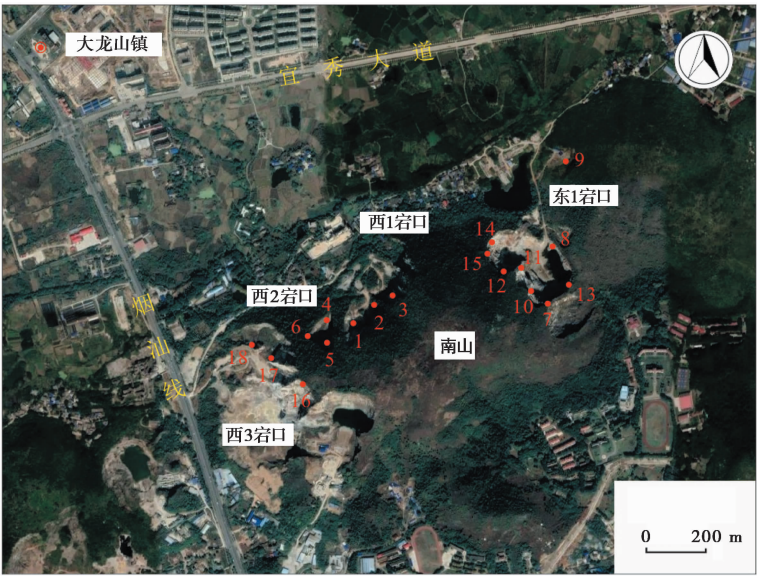


图 5 安庆大龙山集贤关研究区测量点分布图
Fig. 5 The distribution diagram of every measurement point in Dalong Mountain, Anqing

表 2 No.1 号测量点裂隙 4 次测量计算结果

Table 2 The volumetric fracture rate calculations of No.1 measurement point

裂隙组(j)	类型	平均产状	测量次数	球体内单组裂隙体积/cm³	球体内平均裂隙体积/cm³	裂隙面法向裂隙率/%
1	层面	NE25°∠46°	1	4140.87	3597.49	0.791
			2	3706.76		
			3	3302.84		
			4	3239.5		
2	构造	SE118°∠87°	1	3313.99	3419.68	0.653
			2	3802.93		
			3	3092.21		
			4	3469.62		
3	构造	NE44°∠77°	1	2144.68	1895.62	0.362
			2	2247.09		
			3	1517.28		
			4	1673.45		
4	构造	SE92°∠50°	1	681.11	820.78	0.157
			2	793.08		
			3	684.18		
			4	1124.77		

$$V_1 = \sum_{j=1}^4 \bar{V}_j = 3597.69 + 3419.68 + 1895.62 + 820.78 = 9733.79 \text{ cm}^3$$

(3) 计算 1 号测量点体裂隙率:

$$K = \frac{V_r}{V_0} \times 100\% = \frac{9733.79}{4/3\pi \times 50^3} \times 100\% = 1.859\%$$

3.3 研究区体裂隙率测量结果分析

运用以上计算方法对研究区内 2~18 号测量点进行了体裂隙率计算,整理统计安庆大龙山集贤关研究区 18 个测量点体裂隙率结果如表 3。

表 3 研究区 1~18 号测量点体裂隙率值计算结果

Table 3 The volume fracture rate calculations of 1~18 measurement points

测量点编号	所属岩口	体裂隙率/%	测量点编号	所属岩口	体裂隙率/%	测量点编号	所属岩口	体裂隙率/%
1	西 1	1.859	8	东 1	1.978	15	东 1	1.973
2	西 1	2.510	9	东 1	5.023	16	西 3	0.342
3	西 1	2.554	10	东 1	1.366	17	西 3	0.845
4	西 2	1.335	11	东 1	2.582	18	西 3	0.895
5	西 2	2.736	12	东 1	4.190	均值		2.286
6	西 2	3.518	13	东 1	2.853	最大值		5.023
7	东 1	1.818	14	东 1	2.773	最小值		0.342

根据计算结果绘制研究区 18 个测量点体裂隙率频率分布图(图 6)。

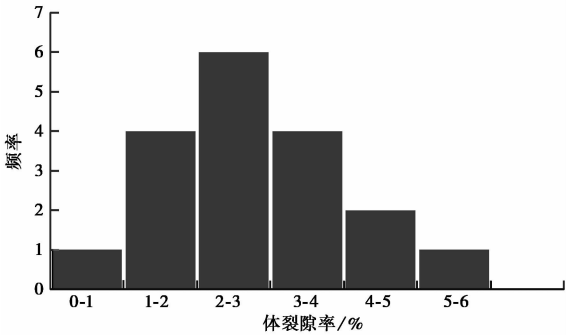


图 6 研究区 1~18 号测量点体裂隙率值频率分布图

Fig. 6 The histogram of volumetric fracture rate of every measurement point

结果表明,研究区体裂隙率值范围在 0.342%~5.023%,均值为 2.286%,集中分布在 1%~4%。结合研究区各个测量点布设区域位置分析,西 1 岩口 1~3 号测量点以及西 2 岩口 4~6 号测量点的体裂隙率在 1.3%~3.5%,整体差异较小,西 2 岩口体裂隙率整体要高于西 1 岩口;西 3 岩口 16~18 号测量点体裂隙率均小于 1%,远小于研究区裂隙平均发育水平,说明西 3 岩口附近裂隙没有其他地方发育;东 1 岩口 7~15 号测量点体裂隙率整体差异性较小,个别点如北侧 9 号以及 12 号测量点差异较大,各测量点体裂隙率的差异体现了裂隙发育的非均一性。

利用球体法对研究区裂隙进行了实地测量,计算了各测量点体裂隙率,在测量计算过程中会产生部分误差,分析误差产生的原因主要为以下几类:

(1) 裂隙发育非均一性产生的误差

由于裂隙在岩体中发育的非均一性,不同观测位置测量隙间距、隙宽等裂隙参数都不相同,这是不可避免的误差,但我们可以通过适当操作来减少这种误差。一是在野外测量时,注意选择具有代表性的裂隙发育地段作为测量点,选取各组裂隙的测量中心尽可能接近,使测量结果更好反映测量点裂隙真实情况。二是同组裂隙在其测量中心一定范围内选取临近基准面进行多次测量取均值以减少测量误差。

(2) 球体中裂隙交切体积重复计算误差

对不同组系裂隙在三维空间中进行叠加,会产生裂隙面相交体积重复计算的误差,相交体积的大小取决于裂隙发育的疏密程度以及隙宽大小。以 1

号测量点裂隙发育情况为例,这部分叠加重复计算的体积最多仅占单元球体的 0.004 55%,对体裂隙率测量结果影响可忽略不计。但当裂隙发育较为密集或隙宽较大时,需要结合实际情况对这部分计算误差进行分析讨论。

(3) 裂隙切面圆台近似视为圆柱计算误差

在计算时视圆柱近似计算得到裂隙与测量球体相切的体积为:

$$V_i = \pi n_i (R^2 - h_i^2) \quad (6)$$

若以圆台计算得到实际裂隙与测量球体相切的体积为:

$$\begin{aligned} V_i &= \int_0^{n_i} \pi [R^2 - (h_i + n)^2] dn \\ &= \pi n_i \left(R^2 - h_i^2 - h_i n_i - \frac{n_i^2}{3} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

那么近似计算产生的绝对误差:

$$\sigma = \frac{\sum (V_i - V_i')}{V_{\text{球}}} = \frac{2\pi \sum \left(h_i n_i^2 + \frac{n_i^3}{3} \right)}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad (8)$$

以 1 号测量点裂隙发育情况为例,这部分近似计算产生的误差仅为 0.000 122%,对体裂隙率测量结果影响不大,一般可忽略不计。故在实际应用时将裂隙切面圆台近似视为圆柱方便计算。

4 结 论

本文通过对球体法测量原理、测量计算方法的叙述,介绍了一种新的、切实可行的野外现场测量岩体裂隙率方法。

由于岩体中同时存在多组裂隙,各组裂隙在三维空间交切形成空间裂隙网络。不同于现有线、面裂隙率从单一面观测裂隙的测量方法,球体法基于构造、成岩裂隙特有的组系性和统计规律性,根据各组裂隙产状从不同方向进行观测,通过多次测量统计岩体出露面上裂隙的发育特征,统计推断其在岩体内部发育状况,其值能更好地反映局部区域岩体内部裂隙的发育程度。

球体法利用专利仪器及方法可以测得沿裂隙面法线方向上的隙宽和隙间距数据真实值,测量条件对出露面平整情况要求不高,测量结果受露头平整性影响不大,具有更好的实用性。此外,在计算体裂隙率的同时,还可以统计整理裂隙间距和隙宽的均值、最值、方差以及裂隙法向上线密度等裂隙特征,

分析研究区裂隙更为详尽的发育规律。

以安庆大龙山采石场研究区为例,野外应用球体法,现场测量表明该方法可以在野外现场较为方便操作的基础上,实现快速测量;研究区体裂隙率均值为 2.286%,整体差异较小集中分布在 1%~4%,结合研究区实际情况以及误差分析结果,说明球体法可以很好地反映研究区各个测量点的裂隙发育程度。

参 考 文 献

- Cai Y Q, Liu Y C. 2001. Geometry parameter analysis on the fracture in tercon nectivity of rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 12(1): 33-39.
- Chen D J, Yu Y Z, Ma N W, et al. 2000. Some main problems on the stability of high permanent shiplock slope for three gorges project[J]. Journal of Engineering Geology, 8(1): 7-15.
- Fan L M, Li N. 2005. Study on rock mass joint measurement based on digital photogrammetry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(5): 792-797.
- Han A G, Nie D X. 2004. Determination of appropriate statistical section length in rock mass structure research[J]. Advances in Earth Sciences, 19(S1): 296-299.
- Liang X, Zhong J G, Shi Y B, et al. 2006. Evaluation of the permeability of rock masses around the equalized room with atmo seal at Ziyili Hydropower Station, Sichuan Province[J]. Earth Science, 31(3): 417-422.
- Li Y P. 2005. Geometrical characteristics of fractures and rock quality assessment in granite in the Beishan Area, Gansu Province[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- Li Y W, Chen Q, Chen L. 2014. Application research on the rock structure classification by surveying line method in Tianhu rock mass[C]//Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, et al. Proceedings of the Fifth Symposium on Waste Underground Disposal. Beijing: [s.n]: 5.
- Ma S Z, Jia H B, Tang H M, et al. 2002. Appraise quality of engineering rock mass with rock cranny ratio based on 3-D network modeling of rock discontinuity[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 29(1): 10-12.
- Ni C Z, Liu C X, Zhang S T. 2013. Estimation of three-dimensional distribution of fissures according to fissure traces on outcrops[J]. Oil & Gas Geology, 34(1): 102-106.
- Pan H Y, Wan J W, Liang X. 2006. Method for determination of representative elementary volume of fractured rate of rock mass[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 26(5): 18-21.
- Press P, Incorporated. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics

- Abstracts, 15(6): 319–368.
- Priest S D, Hudson J A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 18(3): 183–197.
- Song X C, Xu W Y. 2004. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks(I): generation of fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(12): 2015–2015.
- Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. 1995. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 18.
- Wang Z W, Ning L B, Xu H L, et al. 2018. An instrument for measuring volumetric fracture rate of rock mass; China, CN207379386U[P]. 2018–05–18.
- Wei X, Yang C H. 2015. A method of geometric parameter determination of drilling rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(9): 1758–1766.
- Wu A Q, Zhou H M, Ren F. 1998. Research on 3-D rock joint network simulation techniques and its application to TGP[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 15(6): 15–18, 22.
- Xia L, Liu X F, Yu Q C. 2010. Determining representative elementary volume of fractured rock mass based on blockiness analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(12): 3991–3996, 4005.
- Yuan L, Zhou J W, Wen B, et al. 2017. Threshold of ecological geo-indicators of green coating on high-steep slope of limestone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 34(7): 36–40.
- Zhang L, Einstein H H. 1998. Estimating the mean trace length of rock discontinuities[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 31(4): 217–235.
- Zhang R Q, Liang X, Jin M G, et al. 2011. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 128.
- 蔡永庆, 刘亚晨. 2001. 核废料地质贮存岩体裂隙结构面几何特性参数分析[J]. 地质灾害与环境保护, 12(1): 33–39.
- 陈德基, 余永志, 马能武, 等. 2000. 三峡工程永久船闸高边坡稳定性研究中的几个主要问题[J]. 工程地质学报, 8(1): 7–15.
- 范留明, 李宁. 2005. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 24(5): 792–797.
- 韩爱果, 聂德新. 2004. 岩体结构研究中统计区间长度的确定[J]. 地球科学进展, 19(S1): 296–299.
- 梁杏, 钟嘉高, 施裕兵, 等. 2006. 四川自一里水电站气垫式调压室围岩渗透性评价[J]. 地球科学, 31(3): 417–422.
- 李亚萍. 2005. 甘肃北山花岗岩裂隙几何学特征研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 李亚伟, 陈强, 陈亮. 2014. 测线法在天湖岩体结构划分中的应用研究[C]//中国岩石力学与工程学会等. 第5届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: [出版者不详]: 5.
- 马淑芝, 贾洪彪, 唐辉明, 等. 2002. 利用“岩体裂隙率”评价工程岩体的质量[J]. 水文地质工程地质, 29(1): 10–12.
- 倪春中, 刘春学, 张世涛. 2013. 从岩石露头裂隙迹线估算裂隙三维空间方向[J]. 石油与天然气地质, 34(1): 102–106.
- 潘欢迎, 万军伟, 梁杏. 2006. 岩体裂隙率典型单元体确定方法探讨[J]. 水利水电科技进展, 26(5): 18–21.
- 宋晓晨, 徐卫亚. 2004. 裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型(I): 裂隙网络的随机生成[J]. 岩石力学与工程学报, 23(12): 2015–2020.
- 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 1995. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社: 18.
- 王忠伟, 宁立波, 徐恒力, 等. 2018. 测量岩体裂隙率的仪器: 中国, CN207379386U[P]. 2018–05–18.
- 魏翔, 杨春和. 2015. 钻孔岩体裂隙几何参数确定方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 34(9): 1758–1766.
- 邬爱清, 周火明, 任放. 1998. 岩体三维网络模拟技术及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 15(6): 15–18, 22.
- 夏露, 刘晓非, 于青春. 2010. 基于块体化程度确定裂隙岩体表征单元体[J]. 岩土力学, 31(12): 3991–3996, 4005.
- 袁磊, 周建伟, 温冰, 等. 2017. 石灰岩质高陡边坡覆绿生态地质指标阈值研究[J]. 长江科学院院报, 34(7): 36–40.
- 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 2011. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社: 128.