

岩体节理体积频率的计算方法及工程应用*

章广成^① 李华章^① 林叶^② 向欣^③ 朱志明^①

(^①中国地质大学(武汉)工程学院 武汉 430074)

(^②北京航天勘察设计研究院 北京 100070)

(^③中国长江三峡集团公司 北京 100038)

摘要 利用 Monte-Carlo 原理进行三维结构面网络模拟是研究岩体内节理面发育规律最常用的技术手段,节理体积频率(λ_v)则是影响结构面网络模拟正确与否的关键参数之一,需要根据野外实测节理线频率(λ)进行换算。利用三维结构面网络模拟程序,提出了基于线频率反演节理体积频率的新思路。首先赋给某组节理一个初始体积频率,利用三维结构面网络模拟程序,生成只包含该组节理的三维网络模型样本,计算此模型中该组节理在测线方向上的线频率,不同体积频率(λ_v)对应不同线频率(λ),进而可建立两者的函数关系,最后将测线方向上该组节理的线频率带入该函数即可确定其体积频率。以贵州省息烽县鱼筒河水库坝址区岩体为例,按照上述思路根据测线法统计数据计算了节理体积频率,结果表明 λ_v 与 λ 之间呈现出高度的线性关系。当节理圆盘半径服从对数正态分布时, λ_v 与 λ_{\max} 的比值约为0.4~1.0,而当节理圆盘半径服从负指数分布时, λ_v 与 λ_{\max} 的比值约为1.3~3.5。最后依据《工程岩体分级标准(GB50218-94)》表3.3.1、表3.4.3和表3.4.4,分别基于线频率和体积频率对鱼筒河水库坝址区岩体完整性进行了评价,结果表明,后者评价结果的可信度比前者高。

关键词 节理岩体 体积频率 线频率 三维结构面网络模拟 岩体完整性

中图分类号:TU443 文献标识码:A

ASSESSMENT OF JOINT VOLUME FREQUENCY IN ROCK MASS AND ITS APPLICATION IN ENGINEERING

ZHANG Guangcheng^① LI Huazhang^① LIN Ye^② XIANG Xin^③ ZHU Zhiming^①

(^①Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(^②The Geotechnical Institute of Beijing Aerospace, Beijing 100070)

(^③China Three Gorges Corporation, Beijing 100038)

Abstract The 3D joint surface network simulation is based on Monte-Carlo theory. It is the most common method to study growth regulation of rock mass joints, and joint volume frequency, λ_v . λ_v is determined by λ that is measured in the field. It is one of the key parameters which affect the result of joint network simulation. Using the 3D joint surface network simulation program, a new method is promoted to determine λ_v . This method is based on the back analysis from line frequency to volume frequency. A value to a joint set is given as the initial joint volume frequency, the 3D joint surface network simulation program is adopted to generate a 3D network model which just contains the joint set. Then line frequency along the survey line's trend of the model can be calculated. Therefore, a

* 收稿日期:2011-10-07;收到修改稿日期:2012-01-10.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41102197),国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB710606)和中央高校基本科研业务费专项基金优秀青年教师特色学科团队(CUG090104).

第一作者简介:章广成,主要从事岩土体稳定性评价与防治设计方面的教学和研究. Email:zhangguangc@foxmail.com

series line frequency (λ_v) can be got from the series volume frequency λ . Then the functional relationship can be built up between the line frequency and the volume frequency. Lastly, the actual volume frequency can be determined using the line frequency measured in survey line trend. This paper further takes the rock mass of Yujianhe dam site in Xifeng county, Guizhou province as an example. The results show that there are a good linear relation between λ_v and λ . The ratio between λ_v and λ_{\max} is 0.4 ~ 1.0 when the joint radius obeys to the lognormal distribution. The ratio is about 1.3 ~ 3.5 when the radius does negative index distribution. Eventually, the rock mass integrity at the Yujianhe dam site is appraised using λ and λ_v respectively. The result shows that the latter is more precise than the former.

Key words Jointed rock mass, Volume frequency, Line frequency, 3D joint network simulation, Rock mass integrity

1 引言

岩体的承载能力受岩体节理发育程度影响。完整岩体可以承受较大的弹性变形,而节理岩体即使与完整岩体具有相同的承载能力,前者的变形量却要大的多、稳定性也更差。产生同样的围岩破裂区,节理越发育需要的岩体应力水平越低,反之亦然;在相同的应力作用下,岩体中节理越密集,表明岩体越破碎,产生的围岩破裂区范围则越广,围岩碎胀变形将越大,进而使得工程稳定性更差;因此,岩体中断续节理的发育程度控制着围岩的稳定性^[1]。岩体节理发育程度通常用岩体体积节理数(J_v)、节理密度或节理频率表征,三者物理意义完全相同,均指单位体积岩体中节理的条数,是衡量岩体完整性的重要指标之一。李攀峰^[2]通过分析发育多组贯通性节理时 J_v 的适宜性提出了断续节理岩体 J_v 的修正公式;林峰^[3]通过讨论各种现场测量方法所存在的问题,提出了相应 J_v 的修正系数建议值计算方法;杨春和^[4]利用圆形窗口法估算了节理迹线平均长度和节理迹线中点面密度;胡修文^[5]则探讨了 J_v 在不同围岩分级方法中的应用。为了行文方便,本文采用“节理频率”这一概念,根据不同维度,又可分为线频率(λ)、面频率(λ_a)和体积频率(λ_v)。

节理分布具有明显三维特性,因此,三维结构面网络模型比二维结构面网络模型更能反映岩体中节理的真实状态。然而目前节理数据基本来源于野外局部平面露头,如何根据平面露头数据建立三维结构面网络模型由此显得至关重要,而根据线频率确定体积频率最为关键。

假设节理面为圆盘模型,在对所测节理数据进行分组和统计分析的基础上,获得每组节理的线频率和相关几何参数服从的概率密度函数。对其中任

意一组节理而言,首先预设其体积频率,利用三维结构面网络模拟程序,生成一个只含该组节理的三维结构面模型,然后计算该模型在野外实测测线方向上的线频率,改变体积频率可得到相应的线频率,建立两者之间的函数关系,最后根据测线走向上该组节理的线频率确定其体积频率。同理可依次计算其他各组节理的体积频率,进而才可建立准确的三维结构面网络模型。

2 体积频率计算原理

已有学者提出了一些体积频率的计算方法。伍法权^[6]等研究认为线频率 λ (条· m^{-1}) 和体积频率 λ_v (条· m^{-3}) 存在如下关系:

$$\lambda = 2\pi\lambda_v \int_0^{\infty} R \int_R^{\infty} f(a) da dR \quad (1)$$

式中, a 为结构面半径(m); $f(a)$ 为结构面半径服从的概率密度分布函数。因此,岩体内单组结构面的体积频率可表示为:

$$\lambda_{vk} = \frac{\lambda_k}{2\pi \int_0^{\infty} R \int_0^{\infty} f(a) da dR} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

张有天^[7]根据钻孔法给出了裂隙体积频率的计算公式:

$$\lambda_v = \frac{4n}{\pi\mu_n^2 L \cos\delta} \quad (3)$$

式中, L 为钻孔长度; n 表示体积内与同一组裂隙相交的数目; δ 为钻孔轴线与裂隙面法线的交角; μ_n 为圆盘直径的均值。由于露头尺寸限制,钻孔法对与钻进方向呈小角度相交的节理极易错失,导致体积频率偏小。基于三维结构面网络模拟程序,本文提出根据测线法所测线频率反演节理体积频率的思路。

存在一个 Monte-Carlo 三维结构面网络模型,尺

寸大小为 $a \times a \times a$, 该模型内只包含第 i 组节理, 是依据走向为 γ 的水平测线所测数据生成。采用卡迪尔坐标系统, 规定正东为 X 轴正方向, 正北为 Y 轴正方向, 垂直向上为 Z 轴正方向, 则其中任一随机节理面的中心点坐标可用 (x_r, y_r, z_r) 表示, 设半径为 r , 节理倾向为 α , 倾角为 β 。则该节理面对应的方程式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} l_r(x - x_r) + m_r(y - y_r) + n_r(z - z_r) &= 0 \\ (x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2 &\leq r^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, $l_r = \sin\alpha\sin\beta$, $m_r = \cos\alpha\sin\beta$, $n_r = \cos\beta$ 。在此三维空间布置一条与测线走向相同的虚拟水平线段, 为了方便分析问题, 可将线段中点置于三维模型中点处, 线段长度取 $a/3$, 以消除边界效应, 则线段方程为:

$$\left. \begin{aligned} x &= \sin\gamma \cdot t + \frac{a}{2} \\ y &= \cos\gamma \cdot t + \frac{a}{2} \\ z &= \frac{a}{2} \end{aligned} \right\} \left(-\frac{a}{6} \leq t \leq \frac{a}{6} \right) \quad (5)$$

联立方程(4)和(5)求解得

$$t = \frac{l_r x_r + m_r y_r + n_r z_r - (l_r + m_r + n_r) a/2}{l_r \sin\gamma + m_r \cos\gamma} \quad (6)$$

若式(6)中 t 不满足条件 $-\frac{a}{6} \leq t \leq \frac{a}{6}$, 说明结构面与此线段相离, 否则将式(6)代入式(5)中, 并令

$$g(x, y, z) = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2} \quad (7)$$

若 $g(x, y, z) < r$, 表明结构面与该线段相交, 反之相离。故结构面与线段相交的条件为

$$-\frac{a}{6} \leq t \leq \frac{a}{6} \quad \text{且} \quad g(x, y, z) < r \quad (8)$$

采用式(8)依次可对所有结构面进行判定, 记 n 为与测线相交的结构面数量, 则该组节理线频率为

$$\lambda_i = \frac{3n}{a} \quad (9)$$

预设一系列节理体积频率可计算相应的一系列线频率, 进而可建立两者之间的函数关系。

$$\lambda_{vi} = f_i(\lambda_i) \quad (10)$$

将测线实测的节理线频率代入式(10)即可求得该组节理的体积频率。应当指出, 节理空间分布具有各向异性, 不同方向节理线频率存在差异, 因而若能获得 3 个正交方向的线频率, 并按照式(10)计算得到一个体积频率最接近 3 个线频率, 即为该组节理的真实体积频率。

利用上述思路可分别求其他各组的节理体积频率, 若岩体内发育有 m 组结构面, 则岩体结构面的总体积频率为

$$\lambda_v = \sum_{i=1}^m \lambda_{vi} \quad (11)$$

利用 Monte-Carlo 原理编制了三维结构面网络模拟程序, 其中随机数生成器由 Microsoft EXCEL 2007 产生, 该生成器一次可生成 60 万条随机节理。按照上述流程编写了节理线频率的计算程序。

3 工程应用

贵州省息烽县鱼简河水库工程位于息烽河上游鱼简河河段, 该河段展布方向总体呈 NNE, 至下游梅家桥附近转为 NW 向。本区出露地层从新到老依次为: ①三叠系中统狮子山组 (T_2sh), 厚约 65.0m, 岩性以(浅)灰色中厚层灰岩和白云岩为主; ②三叠系中统松子坎组第三段第二层 (T_2s^{3-2}), 厚约 23.0m, 岩性为灰(黄)色薄-中厚层泥晶灰岩、泥质白云岩和杂色钙质泥(页)岩互层; ③三叠系中统松子坎组第三段第一层 (T_2s^{3-1}), 未见底, 岩性以(深)灰色中厚层微晶灰岩、白云岩为主。岩体中构造节理和卸荷裂隙较为发育。

在研究区共布置 7 条精测线对不同工程部位岩体内所发育的结构面进行了统计, 其中 3 条测线数据较多, 选作本次研究的原始数据来源(表 1), 分别用测线 A、测线 B 和测线 C 表示。

表 1 鱼简河水库测线布设位置

Table 1 Scanline location of Yujianhe reservoir

测线 编号	参 数				所属 地层
	位置	露头 产状	测线 走向	岩性	
测线 A	导流洞 出口 15 ~ 55m	145°∠90°	235°	(浅)灰色中厚层灰岩和白云岩	T_{2sh}
测线 B	导流洞 进口 53 ~ 100m	153°∠90°	243°	灰(黄)色薄-中厚层泥晶灰岩、泥质白云岩和杂色钙质泥(页)岩互层	T_{2s}^{3-2}
测线 C	导流洞 进口 5 ~ 53m	153°∠90°	243°	(深)灰色中厚层微晶灰岩、白云岩夹少量杂色泥(页)岩。	T_{2s}^{3-1}

表 2 是 3 条测线所有结构面组的间距、倾向、倾角、半径等几何参数所服从的概率密度函数类型及有关参数统计结果^[8]。

表 2 结构面几何参数概率统计结果

Table 2 Probability statistics of structure plane geometry parameter

测线编号	几何参数	节理 1				节理 2				节理 3			
		密度函数类型	μ (或 λ)	σ	期望值 E	密度函数类型	μ (或 λ)	σ	期望值 E	密度函数类型	μ (或 λ)	σ	期望值 E
A	间距/m	负指数	0.29		3.41	负指数	1.89		0.53	负指数	0.24		4.17
	倾向/(°)	对数正态	5.28	0.03	196.08	对数正态	5.5	0.06	245.13	对数正态	5.69	0.01	295.02
	倾角/(°)	对数正态	4.19	0.13	66.58	对数正态	3.99	0.21	55.26	指数	0.21	69.32	64.60
	半径/m	负指数	2.25		0.44	对数正态	-0.16	0.38	0.92	对数正态	0.24	0.29	1.33
B	间距/m	负指数	0.58		1.74	负指数	2.04		0.49				
	倾向/(°)	正态	305.04	1.88	305.04	对数正态	5.51	0.06	247.66				
	倾角/(°)	正态	76.25	2.16	76.25	对数正态	4.05	0.13	57.92				
	半径/m	负指数	1.85		0.54	负指数	2.91		0.34				
C	间距/m	负指数	2.78		0.36	负指数	0.69		1.46				
	倾向/(°)	对数正态	5.49	0.07	242.54	对数正态	5.68	0.02	294.18				
	倾角/(°)	对数正态	3.99	0.12	54.25	指数	0.12	77.48	69.35				
	半径/m	对数正态	-0.01	0.28	1.03	负指数	2.01		0.50				

3.1 体积频率与线频率的关系

由于是基于三维结构面网络模拟程序计算节理线频率,故对于某一节理组,即使采用同一体积频率,也绝对不会出现结构面网络模型雷同现象,从而使得按照上述原理计算的线频率不可能为某一固定值。

为说明线频率与体积频率的关系及本文思路的可行性,以测线 A 节理组 2 为例开展分析。图 1 为体积频率分别取 $\lambda_v = 0.50、1.00、1.50、2.00$ 时(模型尺寸为 $150 \times 150 \times 10\text{m}$)该组节理线频率各计算 10 次的结果。图 1 结果表明:(1)在尺寸相同的前提下,节理体积频率越大,线频率波动性越大;(2)体积频率与线频率之间存在对应关系,且为正相关。

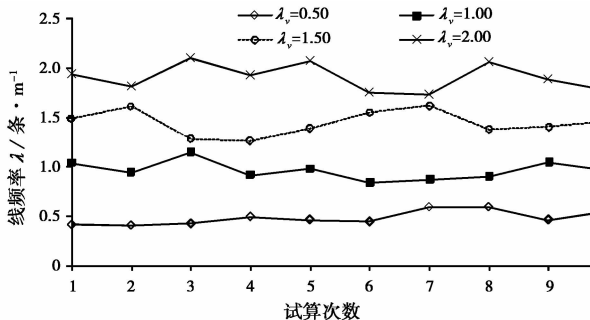


图 1 不同体积频率反演的线频率

Fig. 1 The inversion value of λ by λ_v

3.2 体积频率的确定

从图 1 可知,节理体积频率一定时,线频率存在

波动性,模型尺寸足够大时,波动幅度较小,且是以某线为基准,在其上下一定范围内波动,该基准线即为该节理组的线频率,其大小可根据多次计算结果求平均值确定。基于此,分别计算了表 2 各测线所代表岩体内发育各组节理的体积频率与线频率的函数关系(图 2 ~ 图 4)。

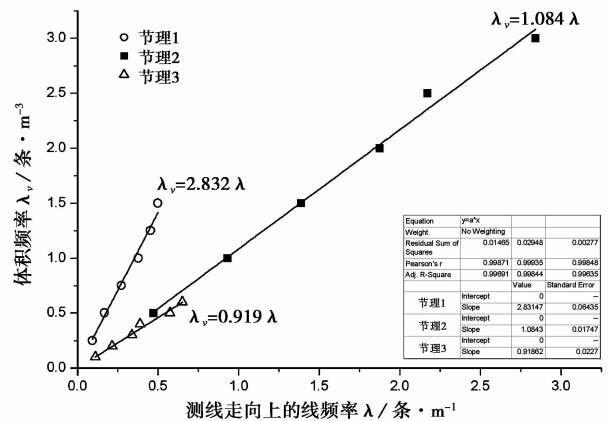


图 2 测线 A 体积频率与线频率的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of λ and λ_v in scanline No. A

结果表明:节理线频率与体积频率呈现高度正线性关系,拟合的线性函数如图 2 ~ 图 4。即形如

$$\lambda_v = a\lambda \quad (12)$$

式(12)中系数 a 为非负数。

根据所布设测线方向上的线频率,按照式(12)依次确定所有节理组的体积频率,进而也可计算各节理组优势方向的线频率。若设优势节理组倾向为 δ ,倾角为 θ ,则节理组优势方向的线频率 λ_{\max} 可表示

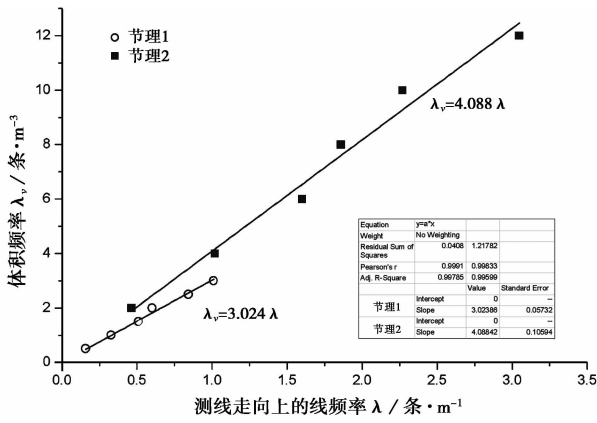


图3 测线B 体积频率与线频率的关系曲线
Fig. 3 Relation curve of λ and λ_v in scanline No. B

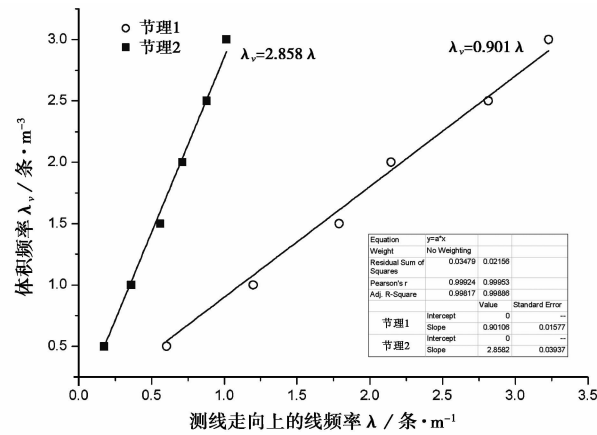


图4 测线C 体积频率与线频率的关系曲线
Fig. 4 Relation curve of λ and λ_v in scanline No. C

为:

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda}{|l_r l_o + m_r m_o + n_r n_o|} \quad (13)$$

其中, $l_o = \sin\delta\sin\theta, m_o = \cos\delta\sin\theta, n_o = \cos\theta$ 。

根据以上原理,分别计算了测线A、测线B和测线C所代表岩体的结构面线频率与体积频率(表3)。由表3可知,当节理半径服从负指数分布时, λ_v 与 λ_{\max} 的比值约为 1.3 ~ 3.5,而当节理半径服从对数正态分布时, λ_v 与 λ_{\max} 的比值约为 0.4 ~ 1.0。

根据计算的体积频率,分析得到不同走向(测线水平布置)上线频率的变化规律(图5 ~ 图7)。根据图5 ~ 图7所示各节理组不同水平方向线频率与实测测线方向线频率对比发现,根据反演体积频率所计算的测线方向的线频率与实测值非常吻合,由此可见本文计算体积频率的思路是可行的。

表3 节理体积频率与测线走向线频率的关系

Table 3 the relation of λ_v and λ about joint sets

测线编号	节理组	测线方向 λ	$\lambda_v = a\lambda$	λ_v	λ_{\max}	完整程度	
						表 3.3.1	表 3.4.3
A	节理1	0.293	$\lambda_v = 2.832\lambda$	0.829	0.410		
	节理2	1.887	$\lambda_v = 1.084\lambda$	2.046	2.333	较完整	较完整
	节理3	0.240	$\lambda_v = 0.919\lambda$	0.220	0.532		
B	节理1	0.575	$\lambda_v = 3.024\lambda$	1.738	1.263		
	节理2	2.039	$\lambda_v = 4.088\lambda$	8.335	2.414	较完整	较破碎
C	节理1	2.781	$\lambda_v = 0.901\lambda$	2.506	3.427		
	节理2	0.687	$\lambda_v = 2.858\lambda$	1.963	1.171	较破碎	较完整

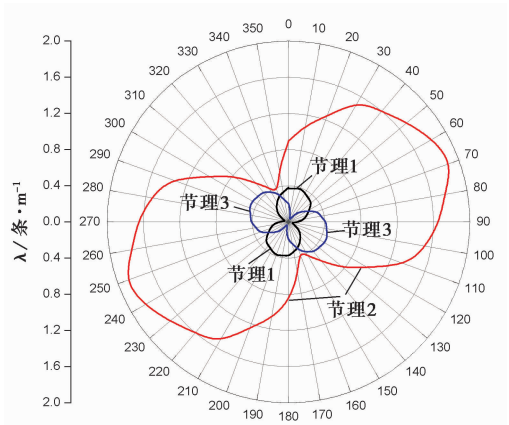


图5 测线A 线频率随走向的变化曲线
Fig. 5 The variation of λ with scanline trend of No. A

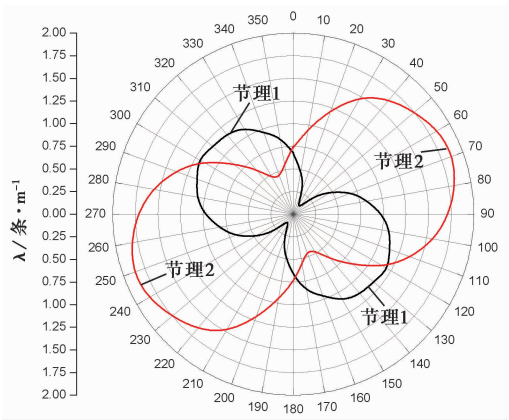


图6 测线B 线频率随走向的变化曲线
Fig. 6 The variation of λ with scanline trend of No. B

4 在岩体完整程度评价中的应用

《工程岩体分级标准(GB50218-94)》提供了评价岩体完整程度的依据和标准^[9],结合本文研究内容,分别从线频率和体积频率角度,对表3各测线所代表岩体的完整程度进行了评价。

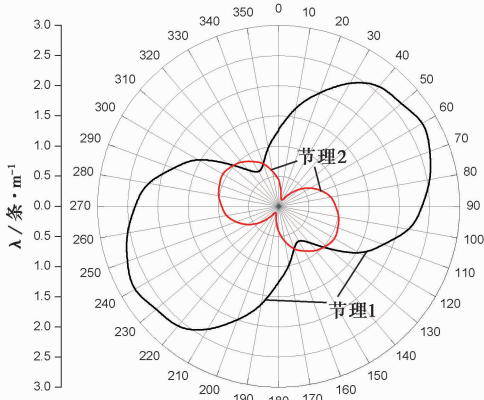


图7 测线C线频率随走向的变化曲线

Fig. 7 The variation of λ with scanline trend of No. C

若依据线频率,查该规范表3.3.1可定性为:测线A和测线B所代表的岩体均较完整,测线C的岩体完整性较差;而依据体积频率,查该规范表3.4.3和表3.4.4可评价为:测线A和测线C的岩体较完整,测线B的岩体较破碎。后者与Q法、RMR法等评价结果一致^[10],而前者与其他方法评价结论完全相反。可见,根据岩体节理体积频率进行岩体完整程度评价,结果更准确。

5 结论

岩体节理体积频率是研究岩体内节理发育特征的一个关键参数,准确获取该值直接影响岩体等级划分。

(1)本文提出的岩体节理体积频率的计算思路简单、意义明确,能很好地计算节理的体积频率。

(2)当体积频率一定时,采用本文思路计算的某走向上的线频率具有波动性,其值以某线为基准上下波动,该基准线即为该节理组在计算方向上的线频率。

(3)体积频率与线频率之间存在着良好的线性关系(公式(12)),其物理意义为一条经过原点的斜直线,直线斜率大小与节理圆盘半径所服从的概率密度函数类型有关。

(4)与线频率相比,体积频率更能准确评价岩体完整程度。

参 考 文 献

[1] 刘刚,赵坚,宋宏伟,等.节理密度对围岩变形及破坏影响的试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(11):1737~1741.

Liu Gang, Zhao Jian, Song Hongwei, et al. Physical modeling of effect of joint density on deformation and failure of surrounding rocks. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (11): 1737 ~ 1741.

[2] 李攀峰,杨建宏,杨建,等.节理岩体体积节理数 J_v 的新计算公式[J].工程地质学报,2009,17(2):240~243.

Li Panfeng, Yang Jianhong, Yang Jian, et al. New formulae for volumetric joint count J_v of jointed rock mass. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 240 ~ 243.

[3] 林锋,黄润秋,王胜,等.岩体体积节理数(J_v)的现场测量方法评价[J].工程地质学报,2008,16(5):663~667.

Lin Feng, Huang Runqiu, Wang Sheng, et al. Evaluation of in-situ measurement methods for counting volumetric joints of rock mass. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 663 ~ 667.

[4] 杨春和,包宏涛,王贵宾,梅涛.岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2475~2480.

Yang Chunhe, Bao Hongtao, Wang Guibin, Mei Tao. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (12): 2475 ~ 2480.

[5] 胡修文,胡盛明,卢阳,等.岩体体积节理数的统计方法及其在围岩分级中的应用[J].长江科学院院报,2010,27(6):30~34.

Hu Xiwen, Hu Shengming, Lu Yang, et al. Measurement of volumetric joint count and its application in surrounding rock classification. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6): 30 ~ 34.

[6] 伍法权.统计岩体力学原理(第一版)[M].北京:中国地质大学出版社,1993.

Wu Faquan. Statistical Rock Mass Mechanics Theory. Beijing: China University of Geosciences Press, 1993.

[7] 张有天.岩石水力学与工程[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

Zhang Youtian. Rock Hydraulics and Engineering. Beijing: China WaterPower Press, 2005.

[8] 章广成.复杂裂隙岩体等效力学参数及工程应用研究[D].武汉:中国地质大学,2008.

Zhang Guangcheng. Study on the Equivalent Mechanical Parameters of Complicated Fractured Rock Mass and Their Engineering Application. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.

[9] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218-94 工程岩体分级标准[S].北京:中国计划出版社,1995.

the National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218-94 Standard for Engineering Classification of Rock Masses. Beijing: China Planning Press, 1995.

[10] 唐辉明.贵阳市息烽县鱼筒水库坝基岩体工程地质特性专题研究[R],武汉:中国地质大学,2008.

Tang Huiming. Research on the Engineering Geological Characteristics of Rock Mass of Yujianhe Reservoir Dam Foundation in Xifeng County, Guiyang City. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.