

# 基于三维裂隙网络 RQD 的确定及最佳测线数量的研究

张 文, 陈剑平, 牛岑岑, 鲍硕超, 许德智

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘 要:** 作为评价岩体质量好坏的重要指标, RQD 的应用已十分广泛, 其在工程地质与岩土工程的分析中发挥着重要的作用。而通过钻孔的方法进行 RQD 的获取具有明显缺点。真实岩体不同方向的 RQD 并不一致, 而以垂直于地表的钻孔获取的 RQD 并不能完全代表整体岩体的好坏程度。引入三维裂隙网络的方法进行 RQD 的计算, 在三维裂隙网络内设立测线, 以测线的形式来模拟钻孔, 获取指定方向的 RQD 值。岩体不同于其他人工材料, 其具有明显的非均质性, 即在不同位置获取的 RQD 值并不一致, 现今 RQD 的研究则鲜有考虑。对岩体内的最佳测线数量进行了研究。结果表明: 当沿  $x$ ,  $y$  与  $z$  轴分别存在 25, 80 与 55 条测线时, 可获取岩体各方向的真实 RQD 值, 且最大限度的节省计算时间以实施进一步的研究。

**关键词:** RQD; 岩体; 阈值; 各向异性; 非均质性

**中图分类号:** TU642.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2013)02-0321-07

**作者简介:** 张 文(1985-), 男, 山东临沂人, 博士, 主要从事裂隙岩体结构稳定性方面的研究。E-mail: zhangwenlch@126.com。

## Determination of RQD and number of optimum scanlines based on three-dimensional fracture network

ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, NIU Cen-cen, BAO Shuo-chao, XU De-zhi

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** RQD, as an important parameter to reflect the rock mass quality, has been applied universally and played an important role in geological engineering and geotechnical engineering. There is an apparent defect for obtaining RQD values through drills. The RQD values vary in different directions. RQD through drills whose direction is perpendicular to the ground can not represent that in the rock mass. In this paper, the three-dimensional fracture network simulation is employed to calculate RQD. Scanlines, represented by the actual drill, are set in the rock mass, and RQD in different directions can be obtained. The rock masses are different from other materials, and the RQD values are different considering different points in the study rock mass. It is not considered in the former studies. The number of the optimum scanlines is studied. The results show that when the scanlines in  $x$ ,  $y$  and  $z$  directions are 25, 80 and 55, the RQD values are real and the computing time is the minimum.

**Key words:** RQD; rock mass; threshold; inhomogeneous; anisotropy

## 0 引 言

19 世纪中叶以来, 统计学与概率论逐渐得到发展与完善, 形成了一套比较完备的学科理论。导致岩体不连续性、各向异性与非均质性的不连续面具有明显的随机性, 其几何形态也是测不准的, 因此采用不确定性理论进行岩体工程的分析具有明显的效果<sup>[1-2]</sup>。岩体三维裂隙网络模拟正是基于统计概率学基础上发展起来的。经过近 60 a 的研究, 三维裂隙网络理论渐趋成熟, 在岩体工程的分析与计算过程中发挥了重要的作用<sup>[3-6]</sup>。

岩体质量指标 RQD 是国际上公认的鉴别岩体好坏的方法。最早是由美国伊利诺斯大学的 Deere<sup>[7]</sup>提

出, RQD 主要利用钻孔的修改岩芯采取率来评价岩体质量的好坏。其定义为: “用直径为 75 mm 的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中钻进, 连续取芯, 回次钻进所取岩芯中, 长度大于 100 mm 的岩芯段长度之和与该回次进尺的比值, 以百分比表示”。其计算方法如下所示:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{X} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (40872170, 41072196); 高校博士学科点专项科研基金项目 (200900061110054); 吉林大学“985”计划项目 (450070021107); 吉林大学创新基金项目 (20121073)

**收稿日期:** 2012-03-09

式中,  $x_i$  为第  $i$  段大于 100 mm 的岩芯的长度,  $X$  为岩芯总长度,  $n$  为总岩芯段数。

但在获取 RQD 时, 并没有考虑到裂隙的方向, 如图 1 所示的层状岩体, 其裂隙间距为 90 mm, 岩体的质量应较差。但获取岩体 RQD 的钻孔是与地面垂直的, 即图 1 中的钻孔与裂隙平行, 这样获取的 RQD 值为 100%, 钻孔也就无法获取真实的裂隙特性。

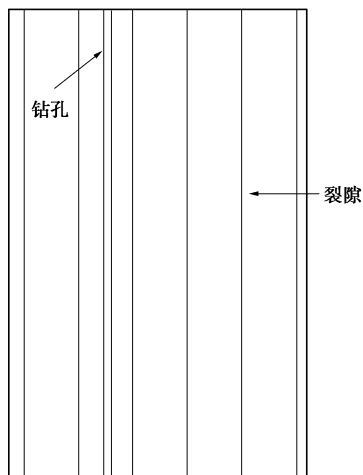


图 1 RQD 获取时的缺陷

Fig. 1 Drawbacks of RQD acquisition

上述可知, 钻孔总是与地面垂直的, 有时无法确定待分析岩体的真实岩体质量, 这就给岩体的分析带来了一定的难度。但借助于三维裂隙网络的方法即可以解决这一难题。三维裂隙网络可模拟一定三维空间内的裂隙分布, 采用人工设定测线以代表钻孔的形式, 并借助于计算机模拟的方式即可以获取测线方向的 RQD 值, 这一方法可沿任意方向, 克服了钻孔只能以一个方向测得 RQD 的缺陷。有了三维裂隙网络模拟这一工具, 还必须考虑到岩体的非均质性特点, 即单纯的一条测线是无法获取岩体真实 RQD 的, 纵使测线方向一样, 岩体中不同位置的 RQD 也是不一样的。本文采用三维裂隙网络模拟的方法研究如何在网络里设置测线以获取岩体 RQD 的真实值, 并节省最大工作量以进行 RQD 的深入研究。

## 1 数据的获取

本文以白鹤滩水电站坝肩岩体作为 RQD 分析的对象。白鹤滩水电站位于金沙江干流下游的四川省宁南县和云南省巧家县境内, 是金沙江下游四大梯级电站之一。

白鹤滩水电站坝址区主要出露二叠系上统峨眉山组玄武岩, 岩层产状为  $N30^{\circ}-55^{\circ}E$ ,  $SE \angle 15^{\circ}-20^{\circ}$ , 缓倾上游偏右岸。坝区走向  $N35^{\circ}-60^{\circ}W$  陡倾角裂隙最发育,  $N24^{\circ}-55^{\circ}E$  陡倾角裂隙次之, 第三为  $N35^{\circ}$

$-60^{\circ}E$ ,  $SE \angle 15^{\circ}-22^{\circ}$  的裂隙。裂隙面形态总体上以波状粗糙为主, 其次为平直粗糙, 少量裂隙面呈弯曲状。裂隙大多无充填或充填厚度极薄的方解脉 (或石英脉), 且通常胶结较好; 少数充填岩屑, 其厚度一般都在数厘米; 除强卸荷带和弱卸荷带局部外, 陡倾角裂隙通常为闭合状。

坝肩岩体主要岩性为玄武岩, 故玄武岩的性质对坝肩的安全性等影响较大。为了了解坝肩岩体的风化、卸荷等情况, 在两岸岩体内设立多个平硐, 本文采用 PD933 号平硐进行岩体 RQD 的计算分析。

以窗口法测量 PD933 平硐内的裂隙作为三维裂隙网络模拟的基础数据。PD933 平硐尺寸为 110 m (长)  $\times$  2 m (高)  $\times$  2 m (宽), 只测量平硐内下游岩体壁的节理裂隙发育情况。平硐内节理裂隙包括柱状节理与随机节理等, 平硐浅处岩体风化与卸荷现象较为严重, 柱状节理发育明显; 深部岩体柱状节理虽然存在, 但多显刚性, 弱化的岩体仍以构造随机节理为主。水电站坝肩的稳定性主要由深部较为完整的岩体决定, 故本文的三维裂隙网络模拟并不考虑浅层的随机裂隙与柱状节理, 深部的随机裂隙是本文的主要研究对象。

现场共测量下游岩体壁的随机裂隙 76 条, 记录每一条裂隙的起始点坐标、终点坐标、倾向、倾角等。以二维迹线图表示此 76 条裂隙, 如图 2 所示。

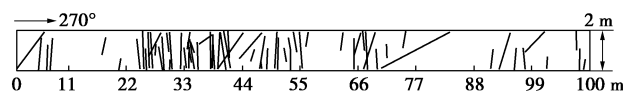


图 2 PD933 平硐内裂隙二维迹线图

Fig. 2 Two-dimensional trace of PD933 exploration adit

裂隙三维网络模拟主要由统计均质区划分, 裂隙产状, 密度与大小的求解与模拟, 蒙特卡洛模拟, 模型验证等 4 部分构成<sup>[8-10]</sup>。裂隙产状, 密度, 大小等的求解与模拟方法视现场的裂隙调查方法而迥异, 一般可分为测线法与窗口法<sup>[11-12]</sup>。本工程中以窗口法进行了裂隙的测量, 故主要介绍窗口法裂隙网络生成方法。三维裂隙网络模拟步骤如下所示<sup>[3]</sup>:

(1) 统计均质区的划分, 现场平硐内裂隙数量较少, 且均质性较好, 故没有进行统计均质区的计算, 即将整个平硐作为一个统计均质区进行三维裂隙网络的计算。

(2) 优势分组。

(3) 对每一组裂隙由于取样过程中导致的产状频率偏差进行校正。

(4) 对每一组裂隙进行观测迹长偏差的校正并针对校正后的观测迹长进行概率密度函数拟合。

表 1 三维裂隙网络模拟参数  
Table 1 Parameters for 3D fracture network modeling

组号	迹长			迹长							
	分布	$\alpha$	$\beta$	实测	校正	$R_0$	$R_1$	$R_2$	范围	均值	方差
1	伽玛	8.9365	0.1457	1.3	2.07	0.11	0.77	0.12	0.54~2.02	8.49	0.19
2	正态	1.4171	0.2472	1.42	2.66	0.26	0.6	0.14	0.71~2.15	6.81	0.25
3	伽玛	1.0768	2.8887	3.11	7.89	0.33	0.53	0.14	0.94~12.56	6.50	8.99

组号	观测频率			直径							体积频率
	观测频率	权系数	真实频率	范围	均值	期望	方差	分布	$\alpha$	$\beta$	
1	1.3	1.6	2.07	0.27~1.93	1.2406	4.7201	75.623	伽玛	6.4538	0.1922	0.38
2	1.42	1.9	2.66	1.25~2.11	1.8564	3.6185	2.3582	正态	1.572	0.04	0.055
3	3.11	2.5	7.89	5.69~12.19	2.2075	6.794	16.122	伽玛	28.9293	0.2941	4.66

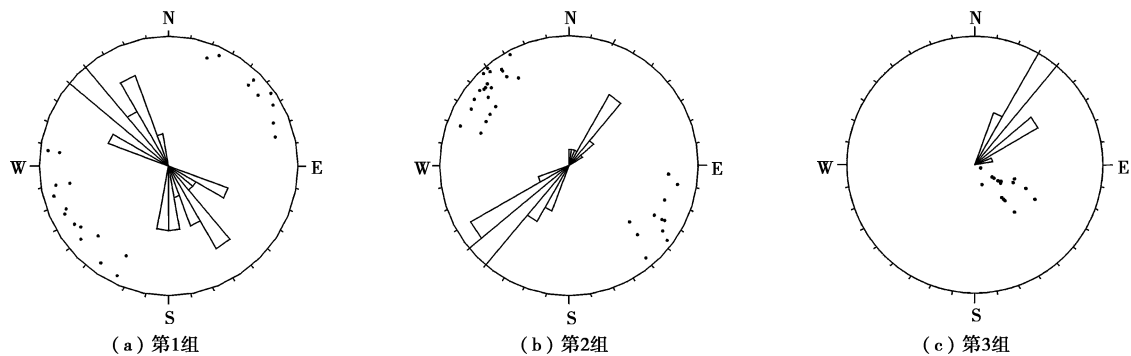


图 3 节理玫瑰花与极点图  
Fig. 3 Pole and strike rose diagrams of fracture sets

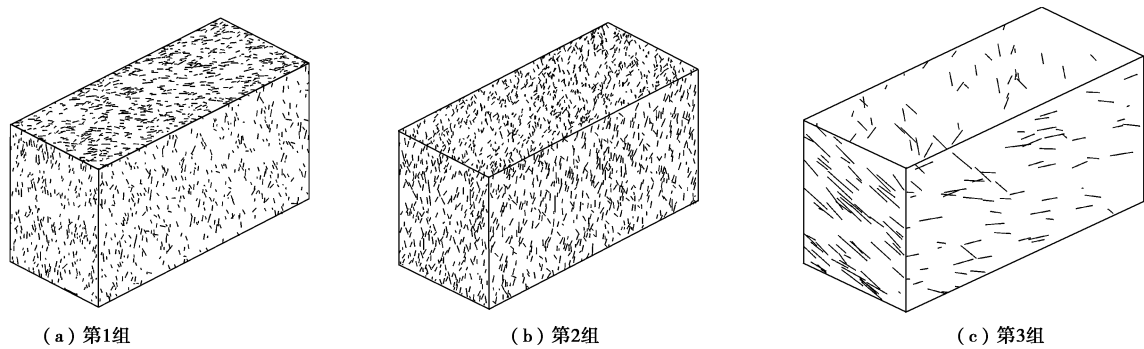


图 4 各组裂隙三维网络显示  
Fig. 4 3D network of various fracture sets

(5) 对每一组裂隙进行直径模拟并对模拟后的直径进行概率密度拟合。

(6) 对每一组裂隙进行密度模拟。

(7) 蒙特卡罗模拟, 建立备选三维裂隙网络数据。

(8) 通过与现场裂隙数据进行对比, 选择最合适的三维裂隙网络模型。

可将 PD933 平硐内的裂隙分为 3 组, 平均产状分别为  $235.4^{\circ}\angle 87^{\circ}$ ,  $310.2^{\circ}\angle 85.5^{\circ}$ ,  $127.9^{\circ}\angle 26.3^{\circ}$ , 采用右手法则, 对各优势分组的裂隙进行玫瑰花图与极点图的绘制, 结果如图 3 所示。

具体三维裂隙网络模拟的步骤不再赘述, 根据上

述各步可得到三维裂隙的参数如表 1 所示。

以最终选定的模型参数进行三维裂隙网络的模拟。基于 OpenGL 技术, 可生成如图 4 所示的裂隙网络图, 网络图的尺寸为  $110\text{ m}(x\text{ 轴})\times 50\text{ m}(y\text{ 轴})\times 50\text{ m}(z\text{ 轴})$ , 由于裂隙数量庞大, 故仅反映其各立方体平面相交的迹线情况。

## 2 RQD 计算

### 2.1 延拓 RQD

一般长度大于  $100\text{ mm}$  的岩芯长度即计入到 RQD 的计算当中,  $100\text{ mm}$  即称为 RQD 计算的阈值, 而阈值是否可以采用  $100\text{ mm}$  尚缺乏充分的论证。目前,

还没有研究资料表明存在最佳的阈值取值; 而且, PD933 裂隙间距较大, 采用 100 mm 作为阈值时, RQD 值为 0%, 不利于 RQD 的研究, 故本节引入延拓 RQD<sup>[13]</sup> 的概念进行最佳测线数量的分析, 即阈值可取为任意正数, RQD 计算如下所示:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{\text{sgn}(x_i - t) + 1}{2} \frac{x_i}{X} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $t$  为选取的阈值;  $\text{sgn}(x)$  为符号函数, 当  $x < 0$  时,  $\text{sgn}(x)$  为 -1, 这样  $x_i$  不计入 RQD 的计算中; 相反, 当  $x \geq t$  时,  $\text{sgn}(x)$  为 1, 这样  $x_i$  即计入 RQD 的计算中。

结合裂隙的间距, 最终裂隙的平均间距即阈值 2 m 对 RQD 进行计算分析, 其可最大程度上反映 RQD 在空间上的变化。

## 2.2 单测线 RQD 计算

本节主要介绍如何采用三维裂隙网络的方法进行 RQD 的获取。钻孔以测线来表示, 即在三维裂隙网络内人工设定测线来模拟钻孔, 以测线与裂隙的交切情况进行 RQD 的计算, 如图 5 所示。

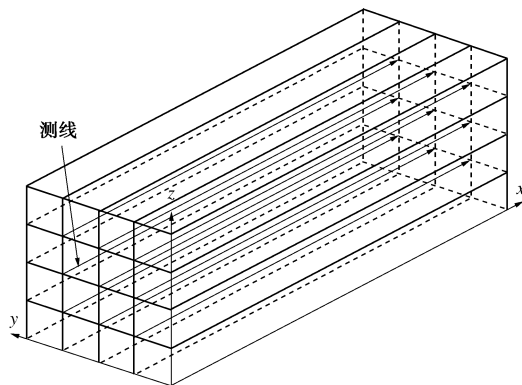


图 5 测线的设立示意图  
Fig. 5 Schematic chart of setting scanline

岩体具有明显的各向异性<sup>[14-15]</sup>, 故沿不同方向计算的 RQD 值是不尽相同的。本节以  $x, y$  与  $z$  轴为例进行 RQD 的计算并确定最佳测线数量, 以单测线  $x$  轴方向的 RQD 计算为例, 其计算步骤如下:

### (1) 确定待分析岩体

值得一提的是, 并非整个三维裂隙网络均需考虑到岩体 RQD 的计算当中。如图 4 所示, 岩体边缘附近裂隙数较少。离岩体中心较近的区域, 圆心位于其周围的裂隙均会将裂隙部分延伸至此区域; 而位于岩体边缘的区域, 岩体外不再存在裂隙, 此区域只存在岩体内部裂隙的延伸, 故岩体边缘区域裂隙密度较少, 存在明显的边缘效应, 导致岩体边缘的 RQD 值与较内部的 RQD 值存在明显差异, 故应剔除岩体边缘部分对岩体 RQD 计算带来的误差。本文采取缩短待分析岩体尺寸的方法来剔除边缘效应对岩体 RQD 计算带来的干扰。假设岩体的尺寸为  $LWH$ , 岩体中各优势

分组的裂隙中最大直径为  $D$ , 则可确定待分析岩体的尺寸为  $(L-2D) \cdot (W-2D) \cdot (H-2D)$ 。根据 PD933 岩体中各优势组的裂隙数据, 可确定最大的裂隙直径为 5 m, 故可确定岩体 REV 待分析岩体的尺寸  $(L-2D) \cdot (W-2D) \cdot (H-2D)$  为  $100 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 。

### (2) 设立测线

测线即代表虚拟的钻孔, 在测线的延展过程中, 会与裂隙相交, 两裂隙之间代表一完整的岩芯(岩桥)。假设测线的延长线交于  $yoz$  平面于  $(x_a, y_a, z_a)$ , 则测线如下所示:

$$\left. \begin{aligned} y &= y_a \\ z &= z_a \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### (3) 计算测线与裂隙的交点

岩体内的裂隙圆盘如下所示:

$$\left\{ \begin{aligned} A(x-x_0) + B(y-y_0) + C(z-z_0) &= 0 \\ (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 &\leq D^2/4 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中  $(x_0, y_0, z_0)$  为裂隙圆盘的圆心坐标;  $D$  为裂隙圆盘的直径;  $A, B$  和  $C$  分别为  $\sin\alpha\cos\beta$ ,  $-\sin\alpha\sin\beta$  与  $\cos\alpha$ , 其中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为裂隙圆盘的倾角与倾。

可联立式 (3)、(4), 建立交点方程。

如公式存在实数解, 则测线与裂隙圆盘存在交点; 若无实数解, 则测线与裂隙圆盘不相交。

针对岩体内所有裂隙, 可依次确定其与测线是否具有交点并确定交点坐标。

### (4) 计算岩芯长度与 RQD

假设测线与岩体内裂隙的交点的  $x$  坐标分别为  $(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ,  $n$  为与测线相交的裂隙的总数目。根据测线与裂隙的交点, 可计算各段岩芯的长度  $x_i$ , 即  $x_i = u_{i+1} - u_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ), 根据岩芯长度, 可采用式 (2) 计算 RQD 值。

## 3 最佳测线数量的确定

由于岩体为非均质性的, 故有必要在岩体内设立多条测线, 以获取岩体的真实 RQD 值。若岩体内设立的测线数量过少时, RQD 值偏重于岩体中的部分区域, 无法代表整体岩体。只有测线数目足够多时, 所测量的 RQD 值才可以代替岩体本身的真实 RQD 值。但如若测线数目过大, 会严重地影响计算速度, 当对 RQD 的后续研究如尺寸效应等极大得浪费了计算的时间。故寻求最佳测线数量可较大程度上利于 RQD 的研究与计算。

本节以  $x$  轴方向的 RQD 计算为例进行最佳测线数量的确定, 测线的设立分为测线组的设立与单个测线的设立。如图 5 所示, 测线组所共存的平面平行于  $xoy$  平面, 假设岩体中设立  $m_g$  个的测线组, 每一个测

线组分为  $m_s$  个单测线。则岩体内共设立的测线个数即为  $m_g \times m_s$ 。

假设测线数量为  $n_1$ , 则计算  $n_1$  条测线的 RQD 值, 以  $n_1$  条测线的均值作为岩体的待选 RQD 值, 记为  $RQD^*$ , 如公式 (5) 所示:

$$RQD^* = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} RQD}{n_1} \quad (5)$$

如果上述计算的  $RQD^*$  值可以代表整体岩体的 RQD 值, 则可认为  $n_1$  为岩体内的最少测线数量, 反之, 需继续增加测线数量。

整体岩体的 RQD 值是比较难以确定的。当测线数量无限多时, 可认为测线的  $RQD^*$  值无限接近于岩体真实 RQD 值。本节在  $x$  轴方向生成 16 个测线组, 测线组所在平面之间间距为 2.5 m, 每个测线组可分为 16 条测线, 测线之间的间距为 2.5 m, 故沿  $x$  轴方向可生成 256 条测线。可见, 测线数目已足够多, 可假设 256 条测线  $RQD^*$  值为真实岩体的 RQD 值。

岩体三维裂隙网络是基于概率统计理论上生成的, 故裂隙的位置是随机的, 并非现场的精确反映, 测线与裂隙圆盘之间的位置关系也是随机的。采用三维裂隙网络进行分析时, 裂隙网络的位置是固定的, 故将测线的位置考虑成随机的才比较符合现场的实际情况。可见, 并不能单纯靠增加测线数量的方法进行 RQD 值变化趋势的研究, 因为测线与裂隙的位置关系是随机的, 故测线数量需基于概率的思想进行确定。本文确定最佳测线数量的思路: 随机选定  $n_1$  条测线, 如果此  $n_1$  条测线的  $RQD^*$  可代替岩体 RQD 值, 而  $n_1-1$  条测线并不能满足上述要求, 可认为  $n_1$  条测线为获取岩体 RQD 值的最少测线数目, 可确定最佳测线数目为  $n_1$ 。

从工程角度, 没有必要严格得要求  $RQD^*=RQD$ , 而当两者之间相差较小时, 即可认为  $RQD^*=RQD$ 。本节假定两者差值在 5% 范围内, 即认为  $RQD^*=RQD$ , 如公式 (6) 所示:

$$\frac{RQD^* - RQD}{RQD} \leq 5\% \quad (6)$$

如上述, 沿  $x$  轴方向可确定 256 条测线, 其均值可代替岩体的真实 RQD 值。设定一定的循环次数  $C$ , 对于每一次循环, 均随机选取一定的测线数目  $n_x$ , 由于考虑测线的位置是随机的, 故随机得选取上述 256 个 RQD 值中的  $n_x$  个, 计算  $n_x$  条测线的均值  $RQD^*$ 。对于  $C$  次循环, 有一部分循环不服从式 (6), 即选取的  $n_x$  条线并不能获取岩体真实 RQD 值; 另外有一部分循环服从式 (6), 即选取的  $n_x$  条测线的  $RQD^*$  可代表岩体真实 RQD 值。记录  $RQD^*$  服从式 (6) 的循环

次数  $n_c$ 。则可确定随机选取  $n_x$  条测线服从式 (6) 的概率如下所示:

$$p = \frac{n_c}{C} \quad (7)$$

当  $p$  值较大时, 即在 256 条测线中选取的  $n_x$  条测线很大程度上服从式 (6), 可认为任取  $n_x$  条测线的均值  $RQD^*=RQD$ , 即  $n_x$  条测线可代替岩体的真实 RQD 值。在这里, 规定  $p \geq 95\%$  即可认为  $RQD^*=RQD$ 。当  $p < 95\%$ , 应继续增加  $n_x$  的值。

如上述, 沿  $x$  轴方向共设立 256 条测线, 同理, 可沿  $y$  轴设立 640 条测线, 沿  $z$  轴设立 640 条测线, 测线组与测线之间的间距均为 2.5 m。循环次数  $C$  设为 1000 次, 测线数量初值设为 1, 以 1 为增量, 不断增加测线数量, 研究满足式 (6) 的循环次数。以  $x$  轴最佳测线数量的确定为例, 程序流程如图 6 所示。

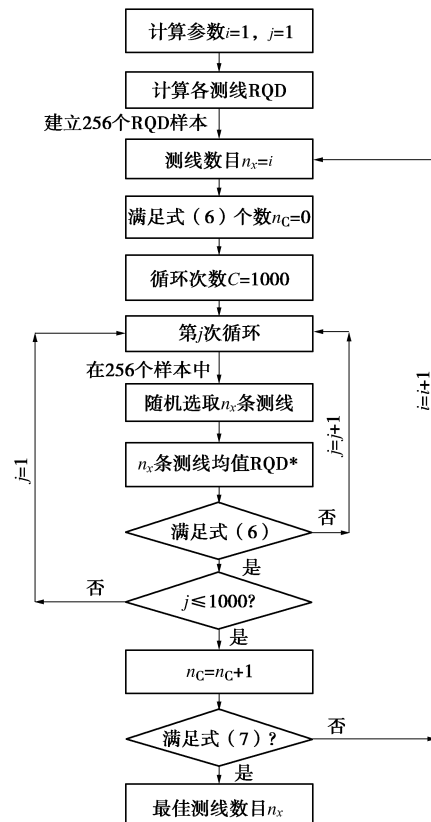


图 6 确定  $x$  轴方向最佳测线数量程序流程图

Fig. 6 Flow chart of number of optimum scanlines in  $x$  direction

如图 7 所示, 测线数量由 1 开始, 增量为 1, 最大值设为 200。可见随着测线数量的增加, 服从公式 (6) 的概率逐渐增大。如当测线数量为 1 时, 循环 1000 次, 服从式 (6) 的次数分别为 272, 164 与 223 次, 即概率分别为 27.2%, 16.4% 与 22.3%, 即随机选取 1 条测线进行 RQD 的计算, 其可代表真实岩体 RQD 的概率较小。岩体具有明显的非均匀性。当取 100 条测线时, 服从式 (6) 的次数分别为 1000, 965 与 991 次, 即概率分别为 100%, 96.5% 与 99.1%, 任取 100

条测线即有较大的概率可代表真实岩体的 RQD 值。为寻求最佳的测线数量,可使  $n_x$  条测线的概率大于 95%。如图 7 所示,当沿  $x$  轴,  $y$  轴与  $z$  轴随机选取 25, 80 与 55 条测线时,测线的均值可代替真实岩体的 RQD 值。测线布置如下:

(1) 沿  $x$  轴测线布置 测线组平行于  $xoy$  平面,测线组个数为 5,测线组之间的间距为 10 m,测线组中的测线个数为 5,测线之间的间距为 10 m。

(2) 沿  $y$  轴测线布置 测线组平行于  $xoy$  平面,测线组个数为 9,测线组之间的间距为 5 m,测线组中的测线个数为 9,测线之间的间距为 12.5 m。

(3) 沿  $z$  轴测线布置 测线组平行于  $xoz$  平面,测线组个数为 5,测线组之间的间距为 10 m,测线组中的测线个数为 11,测线之间的间距为 10 m。

以上以  $x$ ,  $y$  与  $z$  轴方向为例进行了最佳测线数量的分析。岩体具有明显的各向异性,即随着方向的变化,最佳测线数量是变化的。在实际操作过程中,应根据工程的目的确定岩体分析的方向,进而确定最佳测线数量获取 RQD 或进行 RQD 的进一步研究。

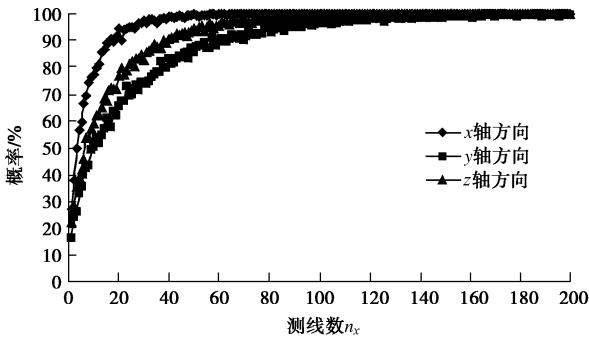


图 7 不同测线数量下服从式 (6) 的概率

Fig. 7 Probability obeying Eq. (6) for different numbers of scanlines

以上假设了 256, 640 与 640 条测线获取岩体  $x$ ,  $y$  与  $z$  轴方向的真实 RQD 值。根据上述,可计算  $x$ ,  $y$  与  $z$  轴方向的 RQD 值分别为 68%, 55%与 65%。可见岩体具有明显的各向异性,沿不同方向计算的 RQD 值并不一致,故基于三维裂隙网络计算 RQD 值具有一定的必要性,局限于方向性限制的钻孔并不能获取岩体的真实 RQD 值。为验证假定的 256, 640 与 640 条测线的正确性,可使测线组与测线的间距缩小一倍,即获得 1024, 2560 与 2560 条测线,采用上述计算步骤,可确定 RQD 值分别为 67%, 56%与 65%。可见,增加测线数量已难以改变 RQD 的值,故认为沿岩体  $x$ ,  $y$  与  $z$  轴设立的 256, 640 与 640 条测线可获取岩体的真实 RQD 值,上述计算的假定是正确的。

值得提出的是,随着阈值的选择不同,最佳测线数量是变化的,如当阈值小于或等于裂隙最小间距时,不同测线的 RQD 均为 100%,任意一条测线均可以代

表岩体的真实 RQD 值。在计算 RQD 值时,需首先选取 RQD 的阈值,在确定阈值的条件下,即可采用上述方法判定最佳测线的数量。

通过上述的方法计算的最佳测线数量有一个明显的优点,即可在岩体中的不同位置设立测线,只要测线与 256 条测线 ( $x$  轴) 中任意一条测线重合即可,任选最佳数量的测线即可获得岩体的真实 RQD 值。

以上对测线的最佳数量进行了分析,其前提为基于三维裂隙模拟得出的 RQD 值在统计意义上可代表现场岩体的 RQD 值。为证明模拟 RQD 与现场 RQD 在统计特征上的一致性,本文列举白鹤滩水电站与溪洛渡水电站的坝肩岩体两个实例进行分析。由于以上岩体完整,裂隙密度小,故均取阈值为 2 m 进行计算。如表 2 所示,本文选取 20 个点进行模拟 RQD 与现场 RQD 的对比,由于现场只能测得竖向方向的 RQD,故模拟 RQD 仅选取  $z$  值方向进行计算。值得一提的是,基于三维裂隙网络模拟计算的 RQD 具有一定的随机性,即各具体位置的 RQD 与现场 RQD 并不是一致的,只有多处 RQD 的统计特征可代表现场岩体的好坏程度。如表 2 所示,白鹤滩水电站坝肩岩体平均模拟 RQD 为 67%,大致等于现场平均 RQD 即 66%;同理,溪洛渡水电站坝肩岩体的平均 RQD 即 58%大致等于现场平均 RQD 即 60%。可见,基于三维裂隙网络计算得出的 RQD 可真实代表现场岩体的 RQD 值水平。

表 2 模拟 RQD 与现场 RQD 值

Table 2 Modelled and field RQD values

计算点 /(m, m, m)	模拟 RQD/%		现场 RQD/%	
	白鹤滩	溪洛渡	白鹤滩	溪洛渡
(20, 10, 50)	63	57	60	59
(40, 10, 50)	65	53	69	56
(70, 10, 50)	69	55	71	57
(100, 10, 50)	64	64	73	68
(20, 20, 50)	70	58	60	55
(40, 20, 50)	72	63	64	56
(60, 30, 50)	67	54	68	65
(60, 40, 50)	68	56	63	63
(90, 30, 50)	63	62	72	57
(90, 40, 50)	69	59	63	65
RQD 均值/%	67	58	66	60

## 4 结 论

(1) 根据白鹤滩坝肩 PD933 平硐获取了二维裂隙数据,在二维裂隙数据的基础上论述了三维裂隙网络模拟的基本步骤,并生成了用以 RQD 计算的裂隙网络。

(2) 提出了基于三维裂隙网络计算的 RQD 的边缘效应,即在网络的边缘裂隙密度较小,会影响整体 RQD 的计算结果,需剔除边缘效应的影响。本文剔除边缘效应后确定待分析岩体尺寸为 100 m×40 m×40 m。

(3) 对延拓 RQD 进行了论述,选取 2 m 为阈值

进行了岩体  $x$ ,  $y$  与  $z$  值的 RQD 计算。RQD 值分别为 67%, 56% 与 65%, 可见岩体具有明显的各向异性, 沿不同方向计算的 RQD 值并不一致, 故基于三维裂隙网络计算 RQD 值具有一定的必要性, 局限于方向性限制的钻孔并不能获取岩体的真实 RQD 值。

(4) 岩体具有明显的非均质性, 即在岩体不同位置所获得的 RQD 值并不一致, 故需设立多条测线进行真实 RQD 的分析与计算。本文采用概率统计的方法确定了沿岩体  $x$ ,  $y$  与  $z$  值方向的最佳测线数量分别为 25, 80 与 55 条, 为 RQD 的真实获取与 RQD 的后续研究提供了强有力的理论支持。

### 参考文献:

- [1] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. (WU Fa-quan. Principles of statistical mechanics of rock masses[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 徐光黎, 唐辉明, 潘别桐, 等. 岩体结构模型与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. (XU Guang-li, TANG Hui-ming, PAN Bie-tong, et al. Structural model and application of rock masses[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 陈剑平, 肖树芳, 王 清. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1995. (CHEN Jian-ping, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Three-dimensional network modeling of stochastic fractures[M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1995. (in Chinese))
- [4] 王坛华. 基于三维裂隙网络模拟技术的裂隙网络水力研究及隧道涌水非线性预测[D]. 长春: 吉林大学, 2008. (WANG Tan-hua. Study of fissured rock mass hydraulics based on 3-D network simulation and nonlinear prediction of gushing water in tunnel[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese))
- [5] 李晓春. 小湾水电站坝肩岩体裂隙网络渗流的三维网络与无网络法耦合模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005. (LI Xiao-chun. Meshless method on seepage in fractured rock mass in Xiaowan dam site with 3D network computational simulating technique for random discontinuous[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese))
- [6] 陈剑平, 卢 波, 王良奎, 等. 复杂不稳定块体的自动搜索及其失稳方式判断—基于随机不连续面三维网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1126 - 1131. (CHEN Jian-ping, LU Bo, WANG Liang-kui, et al. Automatic search for complex unstable rock block and the judgement of instability mode-based on 3D fracture simulation of random fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 22(7): 1126 - 1131. (in Chinese))
- [7] DEERE D. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 1964, 1(1): 16 - 22.
- [8] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, 22(4): 397 - 402. (CHEN Jian-ping. 3-D network numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 22(4): 397 - 402. (in Chinese))
- [9] 陈剑平, 卢 波, 谷宪民, 等. 节理岩体三维综合抗剪强度数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1463 - 1468. (CHEN Jian-ping, LU Bo, GU Xian-min, et al. Numerical simulation study on 3D comprehensive shear strength of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 25(7): 1463 - 1468. (in Chinese))
- [10] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1981, 18(3): 183 - 197.
- [11] 陈剑平, 王 清, 赵红亮. 窗口测线法获取岩体 RQD[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1491 - 1495. (CHEN Jian-ping, WANG Qing, ZHAO Hong-liang. Obtaining RQD of rock mass by sampling window method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 23(9): 1491 - 1495. (in Chinese))
- [12] 陈剑平, 石丙飞, 王树林, 等. 单测线法估算随机节理迹长的数值技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1755 - 1759. (CHEN Jian-ping, SHI Bing-fei, WANG Shu-lin, et al. Numerical modeling technique of single scan line method to assess joint trace length[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 23(10): 1755 - 1759. (in Chinese))
- [13] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacing in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(3): 135 - 148.
- [14] SNOW D T. Rock fracture spacings, openings, and porosities[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(SM1): 73 - 91.
- [15] WINES D R, LILLY P A. Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston Open Pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2002, 39(5): 589 - 602.