

采用全空间块体搜索技术初步研究岩体完整性

张奇华, 边智华, 余美万

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 岩体完整性包括两方面含义: 岩体切割程度和岩体块度。全面反映岩体完整性需要同时考虑结构面间距和长度, 而不仅仅是间距。采用全空间块体搜索技术, 可直观形象地对岩体切割程度及块度进行研究。结果表明, 迹长间距比越大, 岩体被切割程度越高, 完整程度越低。当迹长间距比为 3~4 时, 岩体被切割成较为离散的块体, 对应于完整程度为较破碎即完整~破碎岩体的过渡阶段, 结构类型为次块状。岩体块度不完全取决于结构面间距, 还与切割程度有关, 即要考虑到迹长间距比, 当岩体被完全切割(迹长间距比大于 3~4)时, 块度才基本只受间距控制。这些结论可以作为岩体完整程度及岩体结构类型划分的补充条件。另外, 以迹长服从对数正态分布为例, 讨论不同迹长分布对所得结果的影响。最后, 根据典型工程实例的结构面地质统计资料, 分析岩体完整性及结构类型。研究途径和结论对于深入认识岩体完整性具有较大意义。

关键词: 岩石力学; 岩体完整性; 全空间块体搜索; 岩体结构类型; 迹长间距比; 块度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)03 - 0507 - 09

PRELIMINARY RESEARCH ON ROCKMASS INTEGRITY USING SPATIAL BLOCK IDENTIFICATION TECHNIQUE

ZHANG Qihua, BIAN Zhihua, YU Meiwán

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,
Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Integrity of rockmass has two parts of meanings, i.e. rockmass cutoff degree and rockmass fragmentation degree. Discontinuity length and spacing should be considered both in describing rockmass integrity, rather than the latter only. Rockmass cutoff degree and rockmass fragmentation degree are studied using spatial block identification technique. The results show that the greater the ratio of trace length to spacing of discontinuity is, the higher the cutoff degree is and the lower the integrity is. When the ratio of trace length to spacing is 3 - 4, the rockmass is divided into relatively discrete rockmass, which corresponds to comparative cracked one, i.e. the transition stage of complete to fractured rockmass, accordingly the rockmass structure type is inferior blocky. The rockmass fragmentation degree is not only dependent on discontinuity spacing, but also relevant to the ratio of trace length to spacing. When the rockmass is cut as block entirely, the fragmentation degree is controlled by spacing mainly. These conclusions can be used as supplementary conditions in classification of rockmass integrity and rockmass structure type. Furthermore, based on the conclusions drawn above, the influence of different distribution types of trace lengths with lognormal distribution is discussed. At last, the rockmass integrity and structure type of typical engineering are analyzed according to discontinuity statistic data. The

收稿日期: 2008 - 08 - 01; **修回日期:** 2008 - 12 - 04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50509003)

作者简介: 张奇华(1973 -), 男, 博士, 1994年毕业于中国地质大学地质工程系, 现任高级工程师, 主要从事工程岩体稳定性分析与加固技术方面的研究工作。E-mail: zqh7692@163.com

research ways and the conclusions are of importance to further study of rockmass integrity.

Key words: rock mechanics; rockmass integrity; spatial block identification; rockmass structure type; ratio of trace length to spacing; fragmentation degree

1 引言

岩体由岩块和结构面两部分组成,岩体中广泛存在的结构面如节理、断层、岩层层理、剪切带、软弱夹层等,破坏了岩体的完整性。岩体变形失稳往往是由于结构面发生张开、闭合、错动等而引起的,结构面的存在及其强度很大程度上控制着岩体的强度及稳定性。标准^[1]将岩体完整性与岩块的抗压强度作为评判岩体基本质量的两个基本因素之一,并根据结构面产状、地下水及初始应力状态影响对基本质量指标进行修正。因此岩体完整性问题具有重要的工程意义。

标准^[1]将岩体完整程度分为5级:完整(I级)、较完整(II级)、较破碎(III级)、破碎(IV级)、极破碎(V级)。岩体结构类型与岩体完整性具有很强的对应性,相应地划分为整体或巨厚层状、块状或厚层状、次块状或中厚中薄层状、裂隙块状或碎裂状、散体状。也有文献资料将岩体结构划分为整体、块状、次块状、镶嵌碎裂、散体状。

1.1 岩体完整性的全面表征

结构面间距、长度(迹长)是影响结构面发育程度的两大要素。结构面越长、间距越小,其发育程度越高,岩体越容易被切割成离散块体,岩体完整性越差。本质上,岩体完整性包括两方面的含义:

(1) 岩体切割程度或块体发育程度,即岩体被结构面切割成完全封闭、相互分离的块体的程度,受结构面迹长与间距比值(迹长间距比)影响,该比值足够大时岩体才能够被切割成完全分离的离散块体;

(2) 切割形成的块体大小(即块度),受结构面间距以及迹长间距比影响,当迹长间距比足够大时,结构面间距越小,形成的块体就越小。

然而,目前各种完整性指标中,基本上只认识到块度问题而忽略了岩体切割程度问题;并且只考虑到间距对块度的影响,而忽略了迹长间距比的作用,因此认识是很不全面的。

岩体完整程度通常以岩体完整性指数 K_v ^[1]或结构面间距进行刻画。岩体完整性指数 K_v 是岩体

与岩石弹性纵波速度的比值,结构面越发育,岩体越不连续致密,波的传播速度就越慢, K_v 越低,因此 K_v 是岩体完整程度的综合反映。但是, K_v 取值与岩体完整程度的关系是一种经验关系,难以给人一种直观印象,并且 K_v 毕竟是通过波速的测试而获得,影响测试结果的除结构面发育程度以外的各种因素,都会对 K_v 产生影响。柳赋铮^[2]指出, K_v 与结构面间距不一定有明显相关性, K_v 大时间距不一定大;并提出以结构面间距与 K_v 相结合,综合评价岩体完整程度。

RQD (岩石质量指标)被定义为大于10 cm的钻孔岩芯长度之和占进尺长度的百分比,因此是从一维上通过结构面间距对岩体完整性进行刻画。岩体块度系数(刘克远,1990)、块度指数 RBI ^[3,4]均以结构面间距来划分块度,都考虑到不同块度大小区间取不同权重,本质上都是将块度百分比乘以一定的权重后相加得到的一个参数,未能直接反映结构面长度对岩体完整性的影响。

块度模数(陈德基,1978)以面积大小表示块度,因此在二维上对块度进行认识,可以说部分考虑了结构面长度的影响。

岩体体积节理数 J_v (条/ m^3)也用于表征岩体完整性,其定义^[1]为

$$J_v = S_1 + S_2 + \dots + S_n + S_k \quad (1)$$

式中: S_n 为第 n 组结构面在每米测线上的条数, S_k 为非成组结构面条数。该指标反映了多组结构面对岩体完整性的综合影响。但由于结构面条数与间距的本质意义相同,因此该指标仍只体现了间距对岩体完整性的影响,结构面长度的变化通过影响间距而间接地对 J_v 造成影响。可以设想:岩体内结构面数量一定,结构面长度越大,测到的间距就越小。因此,具有相同 J_v (间距)的岩体,若结构面长度越大,岩体内的结构面数量就越少,然而,相应的切割形成的块体发育情况即完整性并不相同,因此用 J_v 评价岩体完整性是不甚准确的。体积 RQD 的本质意义与 J_v 相同。

因此岩体的完整性表征应该考虑结构面间距、

长度两方面因素。马淑芝等^[5]采用“岩体裂隙率”评价结构面发育程度和岩体的完整性, 可以综合考虑结构面间距和长度的影响。总的来说, 通过结构面间距与长度全面表征岩体完整性的成果很少。

进一步而言, 在一定的结构面发育条件下, 岩体被切割成块体的情况究竟如何, 目前各种岩体完整性指标均不能反映出来。并且, 正因为如此, 这些指标需要大量工程经验积累和检验, 才能被工程应用所接受。如 *RQD* 指标被用于 *RMR* 岩体工程分类系统和 *Q* 分类系统中。

1.2 岩体完整性形象、直接的表征

一定的结构面发育程度下, 岩体能否被切割成为离散的块体, 或只出现少量块体, 而大部分岩体是连续的。如果能够通过结构面地质调查得到的结构面长度(迹长)、间距统计资料, 通过计算机模拟, 搜索出被结构面切割形成的岩石块体, 由此对岩体完整程度进行研究, 则这种研究途径能够量化、直观形象地反映结构面切割形成的块体发育程度, 从而直接揭示岩体完整性的实质, 研究成果可为现行各种完整性划分指标提供补充。

近年来逐步发展完善起来的全空间块体搜索技术, 为深入研究岩体完整性提供了理想工具。

2 全空间块体搜索技术

2.1 全空间块体搜索技术简介

有限长结构面切割形成的三维块体搜索技术^[6~10], 为复杂开挖面组合下(复杂边坡或洞室)的块体搜索, 直接而有效地进行岩体完整性评价、岩体结构类型定量评判等问题的研究提供了先进手段。该技术的含义是: 通过几何拓扑方法, 在一定的岩体空间区域内, 对由三维有限长随机结构面(可包括确定性结构面)网络切割形成的所有封闭块体进行搜索识别。

全空间块体搜索的主要过程^[10]为: (1) 三维结构面网络模拟生成; (2) 结构面(以及岩体边界)之间的交线分析、封闭回路分析; (3) 孤立回路删除、相关回路分析; (4) 封闭块体搜索, 块体搜索正确性检验。

2.2 结构面网络模拟中的几何要素

在模拟生成岩体三维结构面网络后, 搜索结构面网络中的块体问题是纯数学问题。因此, 结构面

网络模拟能否与真实岩体情况充分接近, 直接影响到岩体完整性分析结果, 在此有必要对结构面网络模拟中的几何要素进行简要讨论。

结构面网络模拟中, 结构面几何要素包括: 产状、结构面形态、结构面(体)密度、空间位置。

(1) 结构面形态

结构面形态一般采用圆盘假设。若采用其他如多边形假设, 一方面同样缺乏直接的测试依据, 另一方面也带来了各边边长及其方向等多个未知要素, 给应用带来很大麻烦。因此目前绝大多数文献采用圆盘假设。在圆盘假设下, 结构面迹长与半径之间具有确定的关系式^[9, 11]:

$$E(r_i) = 2E(l_i) / \pi \quad (2)$$

式中: r_i 为某一组结构面的半径, l_i 为迹长, $E(\cdot)$ 为数学期望。

一些研究认为, 迹长服从负指数分布、对数正态分布或 Γ 分布。伍法权^[11]认为: 岩体中的结构面长度, 总是越短小的越多, 因此认为服从负指数分布更为合理, 服从对数正态分布或 Γ 分布可能是在地质统计中容易忽略短小结构面所致。S. D. Priest 和 J. A. Hudson^[12]推荐了在测线法中对小裂缝进行“删节”(censoring)及大裂纹进行“截尾”(truncation)校正。迹长服从负指数分布的密度函数为

$$f(l) = \mu e^{-\mu l} \quad (3)$$

式中: μ 为迹长均值的倒数, 即 $\mu = 1/E(l)$ 。

(2) 结构面体密度与面密度

岩体第 i 组结构面体密度 λ_i^v 是一定岩体区域内的结构面数量, 是三维网络模拟中的控制性要素, 并且该参数不能通过现场直接测得。在结构面满足圆盘假设、空间位置服从均匀分布前提下, 通过数学推导得到其计算式为

$$\lambda_i^v = \frac{\lambda_i^l}{\pi E(r_i^2)} \quad (4)$$

式中: λ_i^l 为结构面沿其平均法向的线密度, 是结构面间距的倒数, 且结构面间距较一致地被认为服从负指数分布。式(4)与 P. H. S. W. Kulatilake 等^[13]所得结果基本一致。

在结构面迹长服从负指数分布前提下, 式(4)可写成如下的形式^[11]:

$$\lambda_i^v = \frac{\lambda_i^1}{2\pi(E(r_i))^2} \quad (5)$$

由式(4), (5)可知, 体密度与结构面长度、间距有关。其比体积节理数 J_v 能更合理地反映结构面发育程度。在进行全空间块体搜索前的三维结构面网络模拟中, 岩体区域内的结构面数以体密度进行计算。

在结构面迹长服从负指数分布前提下, 还可以推导得到结构面体密度 λ_i^v 与面密度 λ_i^a 的关系为

$$\lambda_i^v = \frac{\lambda_i^a}{4E(r_i)} \quad (6)$$

因此, 面密度与线密度的关系为

$$\lambda_i^a = \frac{2\lambda_i^1}{\pi E(r_i)} = \mu\lambda_i^1 \quad (7)$$

式(7)与伍法权^[11]所得结果一致。

(3) 结构面空间位置

结构面空间位置假定为均匀分布, 由此确定随机结构面中心的空间坐标。

(4) 结构面产状

结构面倾角、倾向在一般的工程地质调查中没有进行概率分析, 只给出区间值和均值。在研究岩体完整性时, 由于产状变化对岩体完整性分析结果影响不大, 因此可取确定值进行计算机网络模拟。

3 不同迹长、间距时全空间块体搜索结果与分析

3.1 不同模拟方案及模拟结果

模拟 3 组结构面切割形成的岩石块体发育情况。3 组结构面产状分别为 $202^\circ \angle 53^\circ$, $330^\circ \angle 58^\circ$, $105^\circ \angle 68^\circ$; 结构面迹长均值为 10 m 不变, 服从负指数分布; 间距均值为 1.667~10.000 m, 服从负指数分布。岩体模拟范围为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。

通过全空间块体搜索技术, 随机模拟并搜索得到岩体区域内的块体数, 最大 2 个块体的体积与岩体区域的体积比(体积百分比)如表 1 所示。由于随机模拟得到的结果有一定的离散性, 表中列出了多次随机模拟的结果。对应于表 1, 迹长间距比为 1,

表 1 不同迹长间距比时模拟结果

Table 1 Simulating results with different ratios of discontinuities trace length to spacing

迹长均值 /m	间距均值 /m	迹长间距比	块体数 /个	体积百分比/%	
				最大块体	第 2 大块体
10	10.000	1	260	98.2	0.3
10	10.000	1	177	98.9	0.3
10	5.000	2	1 766	79.0	7.2
10	5.000	2	2 103	89.2	0.5
10	5.000	2	1 558	91.0	0.9
10	3.330	3	8 175	55.5	3.5
10	3.330	3	9 146	40.1	7.1
10	3.330	3	7 737	57.2	2.3
10	3.330	3	8 911	58.5	4.4
10	2.500	4	21 946	12.3	5.3
10	2.500	4	20 874	21.4	5.2
10	2.500	4	22 728	15.0	4.8
10	2.500	4	25 967	9.1	4.9
10	2.000	5	50 731	1.8	1.8
10	2.000	5	53 512	2.3	1.4
10	2.000	5	50 772	3.1	3.0
10	1.667	6	95 534	2.0	1.2

2, 4 时, 某次模拟得到的块体形态及其中最大 1 个块体形态如图 1~6 所示。

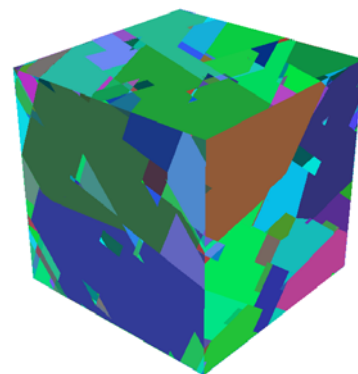


图 1 迹长间距比为 1 时随机模拟的岩体形态(块体数为 177 个)

Fig.1 Rockmass appearance of random simulation with ratio of trace length to spacing as 1(block number is 177)

多次模拟得到的不同迹长间距比时的块体数及最大块体体积百分比分布规律分别如图 7, 8 所示。另设岩体区域为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 结构面迹

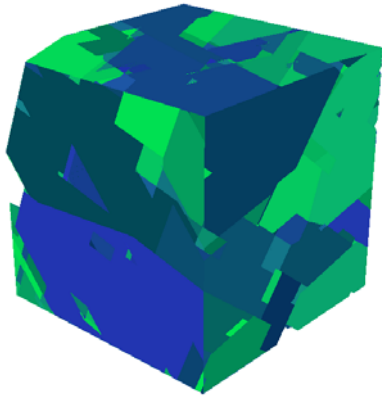


图 2 最大块体形态(体积百分比为 98.9%, 块体内包含 6 个孤立的空洞)

Fig.2 Biggest block(the volume percentage is 98.9%, containing 6 isolated cavities)

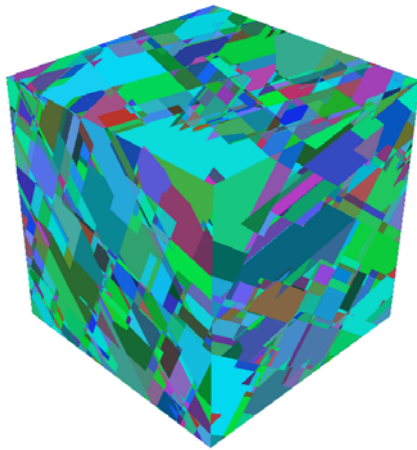


图 3 迹长间距比为 2 时随机模拟的岩体形态(块体数为 1 766 个)

Fig.3 Rockmass appearance of random simulation with ratio of trace length to spacing as 2(block number is 1 766)

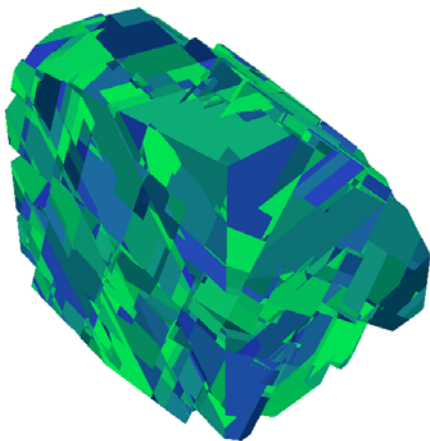


图 4 最大块体形态(体积百分比为 79.0%)

Fig.4 Biggest block(the volume tric percentage is 79.0%)

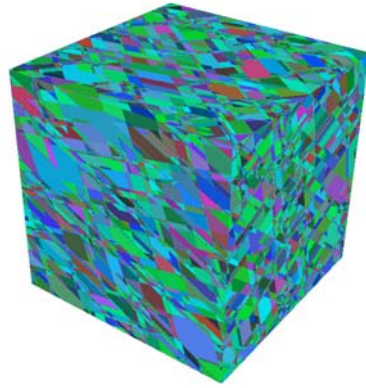


图 5 迹长间距比为 4 时随机模拟的岩体形态(块体数为 21 946 个)

Fig.5 Rockmass appearance of random simulation with ratio of trace length to spacing as 4(block number is 21 946)

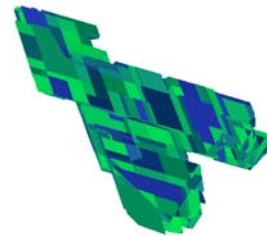


图 6 最大块体形态(体积百分比为 12.3%)

Fig.6 Biggest block(the volume tric percentage is 12.3%)

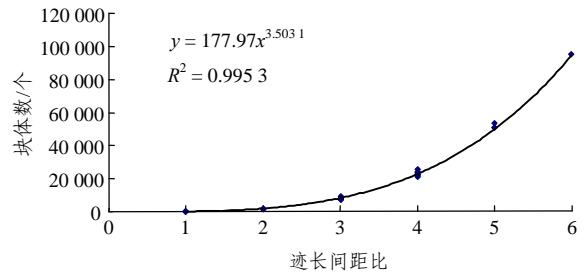


图 7 不同迹长间距比时的块体数(迹长均值为 10 m)

Fig.7 Number of blocks with different ratios of trace length to spacing(the mean trace length is 10 m)

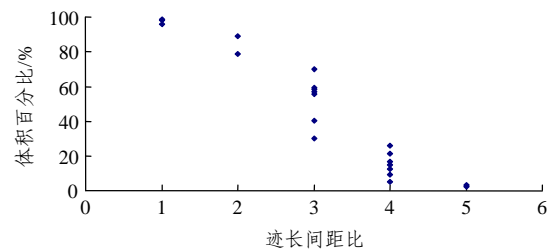


图 8 不同迹长间距比时最大块体的体积百分比(迹长均值为 10 m)

Fig.8 Volume percentage of the biggest block with different ratios of trace length to spacing(the mean trace length is 10 m)

长均值均为 8 m，间距均值为 1~8 m。随机模拟得到不同迹长间距比时的块体数及最大块体的体积百分比分别如图 9，10 所示。

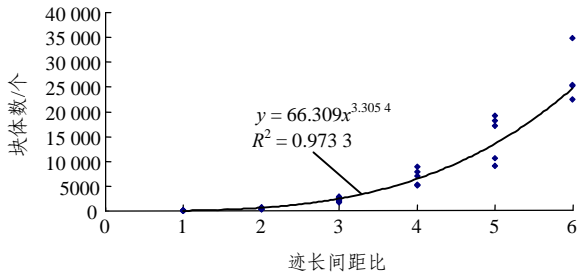


图 9 不同迹长间距比时的块体数(迹长均值为 8 m)

Fig.9 Number of blocks with different ratios of trace length to spacing(the mean trace length is 8 m)

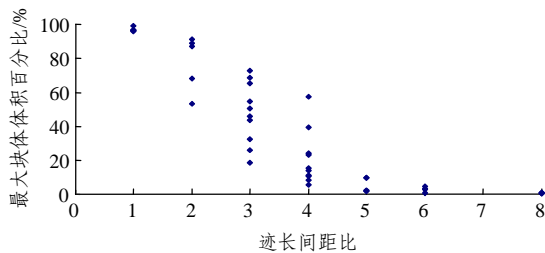


图 10 不同迹长间距比时最大块体体积百分比(迹长均值为 8 m)

Fig.10 Volume tric percentage of the biggest block with different ratio of trace length to spacing(the mean trace length is 8 m)

再另设岩体区域为 10 m×10 m×10 m，间距取 0.6 m 不变，迹长变化时得到的块体数及最大块体体积百分比分别如图 11，12 所示。

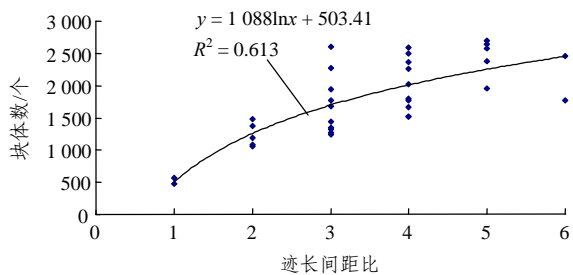


图 11 不同迹长间距比时的块体数(间距均值为 0.6 m)

Fig.11 Number of blocks with different ratios of trace length to spacing(the mean spacing is 0.6 m)

3.2 不同迹长间距比的岩体切割程度

分析图 1~12 可以得到以下认识:

(1) 迹长间距比越大，块体数越多，最大块体的体积百分比越小，因此，岩体被切割程度越高，说明岩体的完整程度越低。

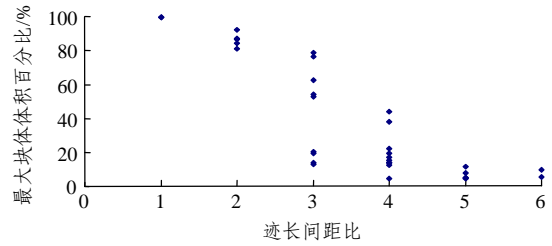


图 12 不同迹长间距比时最大块体体积百分比(间距均值为 0.6 m)

Fig.12 Volume tric percentage of the biggest block with different ratios of trace length to spacing(the spacing mean is 0.6 m)

(2) 最大块体的体积百分比越大，岩体被切割程度越低，岩体连续部分越多(见图 2)，只在其中零星出现一些孤立块体(当然，最大块体的体积百分比越大时，越容易受到模拟的岩体区域边界的影响，即边界效应越明显，但不影响对规律的认识)。从图 8，10 可知，当迹长间距比为 3~4 时，最大块体的体积百分比为 34%~37%(模拟结果的平均值)，此时可认为岩体被切割成较为离散的块体，可以对应于完整程度为较破碎(III 级，为中等程度)，也即完整~破碎岩体的过渡阶段，岩体结构类型为次块状。并且，从图 8，10 还可以看出，当迹长间距比为 3~4 时，最大块体的体积百分比的离散性较大，这正是岩体完整性处于过渡阶段时的特点。

该认识可以作为岩体完整程度及岩体结构类型划分的补充条件，从而克服仅依据结构面平均间距而未考虑结构面长度影响的不足。

G. H. Shi^[9]得出，当迹长间距比约为 10 时，岩体被切割成块体状，该结论与本文结果相差较大，可能是由于其三维结构面网络模拟过程与本文不同所致。本文假定结构面几何参数所服从的分布及结构面网络模拟方法，比较符合岩体真实情况和目前研究趋势，且未采用在三维问题中概念较为模糊的“岩桥”参数。

3.3 岩体的块度

目前对块度的划分仅仅考虑到结构面间距，这种做法是不全面的，还应该考虑到岩体切割程度(与迹长间距比有关)的影响。分析图 1~12 还可以得到以下认识:

(1) 岩体内块体数量越少，则块度越大，岩体完整程度越高。迹长不变、间距变小(岩体内结构面

数量增多)时, 迹长间距比变大, 块体数量近似呈指数大于 3 的幂函数增多(见图 7, 9), 可以理解为结构面间距变化(一维)导致块体数量(三维)呈 3 次方以上地增多, 这个规律符合直观理解; 当迹长间距比达到一定程度后, 岩体能够被完全切割, 此时形成的块体块度主要受间距控制, 如图 10 所示, 尽管迹长间距比为 8 与 6 时岩体均被完全切割, 但相比而言, 前者间距更小, 块体数更多(最大 2 个块体数平均分别为 66 776, 27 016 个), 其体积百分比更小(0.64%, 2.88%), 且模拟结果离散性很小。

(2) 间距不变而迹长增大时, 岩体内结构面数量减少(原因如前述), 迹长间距比变大, 岩体被切割程度增大, 块体数量呈对数函数增多(见图 11); 当迹长增大到一定程度时, 岩体被完全切割, 此后块度主要受间距控制, 由于间距不变则块度变化不大, 因此岩体内块体数量也不会明显增多(对数函数特征)。

通过上述研究可知: 岩体块度不仅仅取决于结构面间距, 还与切割程度有关, 当岩体被完全切割(迹长间距比大于 3~4)时, 块度才基本上只受间距控制。

4 不同迹长分布的影响

影响分析结果的因素包括迹长与间距, 其中, 比较统一的观点为间距服从负指数分布, 然而对于迹长分布, 众多研究表明, 其可能服从负指数分布、对数正态分布或 Γ 分布。负指数分布只有一个参数就是均值, 而其他分布则受均方差影响。上述分析及相应的结果是基于迹长服从负指数分布而得到的, 现假设迹长服从对数正态分布并具有不同的均方差, 以讨论迹长不同分布的影响:

(1) 模型 1: 岩体区域为 100 m×100 m×100 m, 迹长均值为 10 m, 迹长间距比为 3, 设结构面迹长均方差为迹长均值的 2.00, 1.00, 0.50 和 0.25 倍。

(2) 模型 2: 岩体区域为 50 m×50 m×50 m, 迹长均值为 8 m, 迹长间距比为 4, 其余条件相同。

由于前述研究结果认为迹长间距比为 3~4 时, 岩体完整程度为完整~破碎的过渡阶段。因此模型 1 和 2 的迹长间距比分别取为 3, 4, 以讨论不同迹长分布对该结论的影响, 并且模型 1 和 2 都保持迹长均值及迹长间距比不变, 只需讨论迹长均

方差的影响。多次模拟得到块体数及最大块体体积百分比的平均值见图 13。另外, 通过 Monte Carlo 模拟产生对数正态分布的密度函数曲线见图 14。

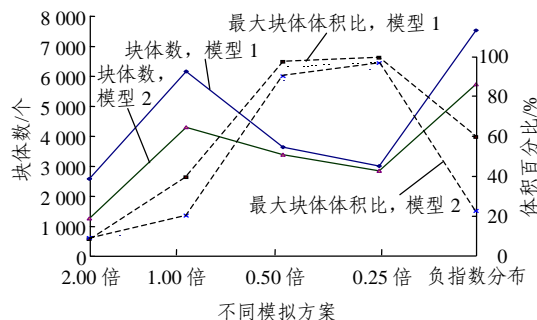


图 13 迹长分别服从对数正态及负指数分布时块体数及最大块体体积比

Fig.13 Block number and volume tric percentage of the biggest block when trace length agrees lognormal and negative exponential distributions respectively

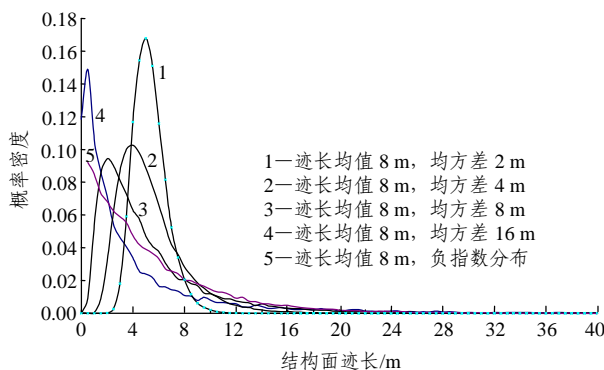


图 14 对数正态分布的概率密度函数

Fig.14 Probabilistic density function of lognormal distribution

分析模拟结果, 可以得到以下认识:

(1) 由于规模大的结构面越容易将岩体切开, 其在切割块体中的作用远大于小结构面。迹长均方差变大, 越容易出现超长结构面(见图 14), 因此岩体越容易被切开而不连续, 最大块体体积变小, 如迹长均方差为均值的 2.00 倍时, 最大块体体积百分比都小于 10%。

(2) 均方差变大, 结构面数变少(据式(4)可知), 但容易出现大结构面, 使得块体数变多(如均方差为均值的 0.25→0.50→1.00 倍变化时), 然而当均方差很大时(如 1.00→2.00 倍变化时), 因结构面数明显减少, 使得块体数减少, 块体数呈先增加后减少趋势。

(3) 均方差越小, 结构面大小的离散性越小(见图 14), 较少出现大结构面, 使得难以较充分地将

岩体离散切割，但由于结构面数量很多，因此容易产生很小的块体。岩体存在一个较大的连续块体，形成“骨架”，内有众多的小块体，呈“镂空状”，如图 15(a)所示，此时最大块体的体积百分比很大(如 0.25 倍时均超过 95%)。反之，均方差越大，结构面越少，但容易出现大结构面，岩体容易被切开，且较少出现很小的块体，形成的块体体积相对较为均匀，最大块体体积不大，如图 15(b)所示。

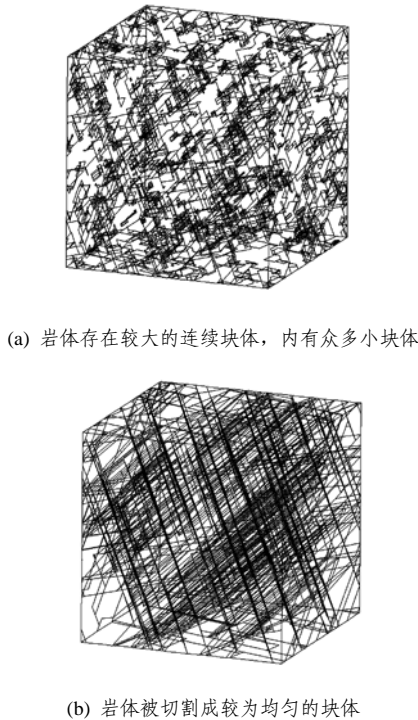


图 15 不同迹长均方差时的岩体切割形态对比

Fig.15 Comparison of appearance of rockmass cutting with square deviations of different trace lengths mean

由于结构面迹长均方差取值对本文节 3.2 和 3.3 的结论有较大影响，因此本文节 3.2 和 3.3 主要针对结构面迹长服从负指数分布而言，并且，根据一些文献资料，迹长均方差与均值较为接近。在此取值范围内，本文节 3.2 和 3.3 给出的规律基本上是成立的。

由于对迹长均方差的可能变化范围缺乏足够多的资料，当均方差与均值相差很大时，需要根据本节对本文节 3.2 和 3.3 的结论进行修正。

5 实例分析

三峡永久船闸边坡某段的结构面统计资料^[14]如表 2 所示。迹长服从对数正态分布，间距服从负指数分布。

表 2 三峡永久船闸边坡某段结构面统计资料^[14]

Table 2 Discontinuities statistic data of some zone of permanent shiplock slope of Three Gorge Project^[14]

结构面组	产状	间距均值/m	迹长	
			均值/m	均方差/m
NNE	117°∠24°	1.32	4.04	2.46
NNW	250°∠73°	1.22	3.63	2.21
NEE	335°∠78°	1.11	3.82	2.33
NWW	24°∠73°	1.25	2.97	1.81

注：迹长统计根据统计窗法而得。

由表 2 可知，4 组结构面的迹长间距比平均为 2.96。根据本文研究结论，当迹长间距比为 3~4 时，对应的岩体完整性为较破碎，据此可判断岩体的完整性为较完整~较破碎(II~III 级)或较破碎(III 级)。另一方面，迹长服从对数正态分布且均方差为均值的 0.6 倍，因此均方差相对较小，根据图 13，与迹长服从负指数分布时相比，最大块体体积百分比更大一些，因此岩体的完整程度要更高一些。最后综合评定岩体的完整性为较完整~较破碎(II~III 级)。

为进行比较，采用全空间块体切割技术进行模拟分析。构造该段边坡区域，其体积为 94 985.56 m³。一次模拟得到块体数为 51 407 个，最大块体的体积百分比为 77.6%(内有 746 个孤立的腔体)。因此岩体基本上没有被切割成离散块体，完整程度为较完整~较破碎，结构类型为块状~次块状。与上述通过本文研究结论进行评定的结果一致。

岩体完整性具有重要的工程意义。当完整性为破碎(IV 级)或极破碎(V 级)时，岩体被切割成离散块体，此时如果结构面力学强度低(胶结程度差、隙宽大、充填泥质等)，很有可能出现较大范围的块体失稳。三峡船闸边坡岩体完整性为较完整~较破碎(II~III 级)，且结构面以硬性居多，因此实际开挖中只出现较为少量的局部块体失稳，且这些块体失稳往往是由于出现非成组的随机长大结构面而引起的。

6 结论

通过本文研究可以得到以下认识和结论：

(1) 结构面长度越大、间距越小，结构面发育程度越高，岩体越容易被切割成破碎状，岩体完整性越差。因此岩体完整性包括两方面的含义：岩体切割程度以及切割形成的块体大小(即块度)。全面

反映岩体的完整性, 需要同时考虑结构面间距和迹长(长度), 而不仅仅只考虑结构面间距。

(2) 通过全空间块体搜索技术, 对岩体切割后形成的块体发育情况进行研究, 可以直观形象地对岩体完整性进行研究。

(3) 迹长间距比越大, 最大块体的体积百分比越小, 岩体被切割程度越高, 完整程度越低。当迹长间距比为 3~4 时, 岩体被切割成较为离散块体, 对应于完整程度为较破碎即完整岩体到破碎岩体的过渡阶段, 结构类型为次块状。该认识可以作为岩体完整程度及结构类型划分的补充条件。

(4) 岩体块度不完全取决于结构面间距, 还与切割程度有关, 即要考虑到迹长间距比; 当岩体被完全切割(迹长间距比大于 3~4)时, 块度才基本只受间距控制。

(5) 以上认识与迹长的分布形式有关, 本文以迹长服从对数正态分布为例, 认为迹长均方差对以上结论有较大影响。由于迹长统计分布资料还不是很多, 因此均方差的影响程度需要进一步进行研究。当迹长均方差与均值较为接近时, 以上结论成立。

另外, 本文研究中, 3 组结构面产状也较为正交(接近真实岩体情况, 当结构面组数大于 3 时, 可能某些结构面组发育程度低一些), 因此本文结论具有较大适用性。工程实践中, 当各组结构面的迹长间距比不一致时, 可通过求其平均值对岩体完整性进行判断估计。

参考文献(References):

- [1] 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, 1994.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218 - 94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1994.(in Chinese))
- [2] 柳赋铮. 岩体基本质量和工程岩体分级[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(增 1): 55 - 63.(LIU Fuzheng. Basic quality and engineering classification of rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(Supp.1): 55 - 63.(in Chinese))
- [3] 张世殊. 坝基岩体块度特征研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 353 - 356.(ZHANG Shishu. The characteristics of rockmass block at dam foundation[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 353 - 356.(in Chinese))
- [4] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义[J]. 水利学报, 2002, (3): 81 - 83.(HU Xiewen, ZHONG Peilin, REN Zhigang. Rock mass block index and its engineering practice significance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (3): 81 - 83.(in Chinese))
- [5] 马淑芝, 贾洪彪, 唐辉明, 等. 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, 2002, (1): 10 - 12, 23.(MA Shuzhi, JIA Hongbiao, TANG Huiming, et al. The quality of engineering rock mass appraised with cranny ratio[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (1): 10 - 12, 23.(in Chinese))
- [6] LIN D, FAIRHURST C, STARFIELD A M. Geometrical identification of three-dimensional rock block systems using topological techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1987, 24(6): 331 - 338.
- [7] IKEGAWA Y, HUDSON J A. A novel automatic identification system for three-dimensional multi-block systems[J]. Engineering Computations, 1992, 9(2): 169 - 179.
- [8] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 51 - 55.(WANG Weiming, CHEN Shenghong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(5): 51 - 55.(in Chinese))
- [9] SHI G H. Producing joint polygons, cutting joint blocks and finding key blocks for general free surfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 161 - 2 170.
- [10] 张奇华, 邬爱清. 随机结构面切割下全空间块体拓扑搜索一般方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 043 - 2 048.(ZHANG Qihua, WU Aiqing. General methodology of spatial block topological identification with stochastic discontinuities cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 043 - 2 048.(in Chinese))
- [11] 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 Faquan. The principle of statistical rock mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.(in Chinese))
- [12] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183 - 197.
- [13] KULATILAKE P H S W, WATHUGALA D N, STEPHANSSON O. Joint network modeling with a validation exercise in Stripa mine, Sweden[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(5): 503 - 526.
- [14] 任放, 邬爱清. 三峡船闸边坡块体结构及锚固方式研究[R]. 武汉: 长江科学院, 1990.(REN Fang, WU Aiqing. Research on block structure and bolt modes of the Three Gorges shiplock slope[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 1990.(in Chinese))