

辽阳硅石矿岩质边坡岩体裂隙宽度概率统计

鲍硕超¹, 王清¹, 鲍新华², 王子健³

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130000;

3. 中国建筑材料工业地质勘查中心 吉林总队, 吉林 长春 130000)

摘 要: 岩体随机不连续面三维裂隙网络模拟是近年来一项评价岩体结构特性的重要手段, 但该模型中并未考虑裂隙宽度对岩体稳定性的影响. 对辽阳石门硅石矿岩质边坡的裂隙进行了现场不连续面窗口调查, 利用卡方检验、K-S 检验相结合的方法, 对所统计的裂隙宽度进行概率统计分析, 从而选取最佳概率分布类型. 统计分析结果表明, 辽阳硅石矿岩质边坡裂隙宽度分布多呈伽马型分布函数, 小于 10 mm 宽度的裂隙占大多数, 构造应力类型对裂隙宽度分布参数起主要影响, 可为三维裂隙网络宽度模拟提供理论依据.

关 键 词: 三维网络; 裂隙宽度; 随机数学; 卡方检验; K-S 检验

中图分类号: TU 452

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0885-05

Probability Statistics Analysis on Rock Fractures Width at Liaoyang Dinas Rock Slope

BAO Shuo-chao¹, WANG Qing¹, BAO Xin-hua², WANG Zi-jian³

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130000, China; 3. Jilin Team of Geological Survey Center of China Building Materials Industry, Changchun 130000, China. Corresponding author: BAO Shuo-chao, E-mail: baoshuochao@126.com)

Abstract: Three dimensional network modeling technique for random discontinuities of rock mass is a significant method to evaluate the structure of rock mass, nevertheless, the effect of fracture width on rock mass stability is not considered in the model. Based on the *in situ* investigation of discontinuity traces in sampling window, the fracture widths of sampling window is analyzed by the method of combining chi-square test and K-S test, and finally, the optimum probability distribution types were chosen. The statistic analysis results showed that the main distribution type of fracture widths of Liaoyang Shimen dinas rock slope is gamma distribution, most fracture widths are under 10 mm, and type of tectonic stress affected the distribution parameters of fracture widths greatly. This result can provide theoretical basis for 3D network modeling of the fracture width.

Key words: 3D network; fracture width; stochastic mathematics; chi-square test; K-S test

岩体中的节理、裂隙等不连续面很大程度决定了岩体的变形与破坏. 在实际岩体中, 裂隙多有不同程度的张开, 裂隙的宽度直接反映了岩体的变形与破坏程度, 很大程度上影响了岩体的力学性质^[1-2]. 例如存在数条闭合或近闭合裂隙的岩体, 其力学性质要远远优于仅存在少量张开宽度较大的裂隙的岩体. 因此, 裂隙的宽度分布规律在岩

体裂隙系统及岩体变形与稳定研究中不可忽视.

近年来, 一些学者对裂隙系统进行了研究^[3-5], 陈剑平^[6]提出的不连续面三维网络数值模拟技术对岩体中的裂隙系统进行统计及模拟所取得的效果较好. 但该系统将裂隙面统一视为无宽度的薄圆盘, 并不具备模拟裂隙张开宽度的功能. Barton^[7]对岩体节理进行了统计及模拟, 提出

了一种确定节理张开度的间接方法. 周创兵等^[8]基于界面层力学模型, 提出确定裂隙平均力学张开度的间接方法, 并通过非饱和渗流试验绘制了裂隙近似张开度的概率分布曲线, 建议其服从单参数 Gamma 分布. 赵芳等^[9]用角点分段算法对裂隙进行分段后, 采用数字图像方法对岩体裂隙进行测量, 测量精度较高.

前人对岩体裂隙宽度进行研究时, 多为对裂隙张开宽度的调查及统计, 对岩体中裂隙宽度的分布规律研究程度较浅. 故本文将对岩体中裂隙网络系统中的裂隙宽度进行野外窗口调查统计, 并采用随机数理统计对裂隙进行概率密度分布拟合, 找出其分布规律, 为不连续面三维网络系统中的宽度模拟提供理论依据.

1 概率统计分析方法

实际岩体中, 由于裂隙宽度的概率密度分布是未知的, 因此找到其最佳密度函数比较困难. 故本次研究在进行统计分析时, 先对裂隙宽度样本分布进行分布假设, 再利用假设检验来验证分布的有效性, 从而确定裂隙宽度样本的分布概型. 在假设检验的过程中, 采用随机数理统计中卡方检验及 K - S 检验相结合的办法, 提高检验结果的可靠性.

本文选取岩体二维空间内一定大小矩形区域内的裂隙宽度作为待检测样本, 将裂隙宽度划分成不同区间, 编程流程图见图 1, 统计分析步骤如下.

1) 建立假设分布函数. 根据对前人在概率统计分析中的各种分布概型的统计分析, 确定将 8 种常用的概率密度分布函数作为假设分布函数, 即: 三角分布、均匀分布、泊松分布、二项分布、正态分布、指数分布、对数分布及伽马分布函数.

2) 确定分析样本区间. 将裂隙宽度样本分成 k 个不相交的区间, 一般取 $5 < k < 20$, 并计算各区间内样本观测频率值.

3) 进行假设检验. 将各区间样本观测频率值与理论分布频率值进行比较, 计算卡方值 χ^2 , 并判断是否接受假设, 若接受假设, 则可进一步进行 K - S 检验. 将样本观测值的累积频率与假设概率密度分布函数的理论累积频率进行比较, 计算出最大差异值 D_n , 并判断是否接受假设. 若同时接受卡方检验与 K - S 检验, 则综合比较卡方值 χ^2 与 D_n 值, 选取两者均较小的一组作为最优拟合函数.

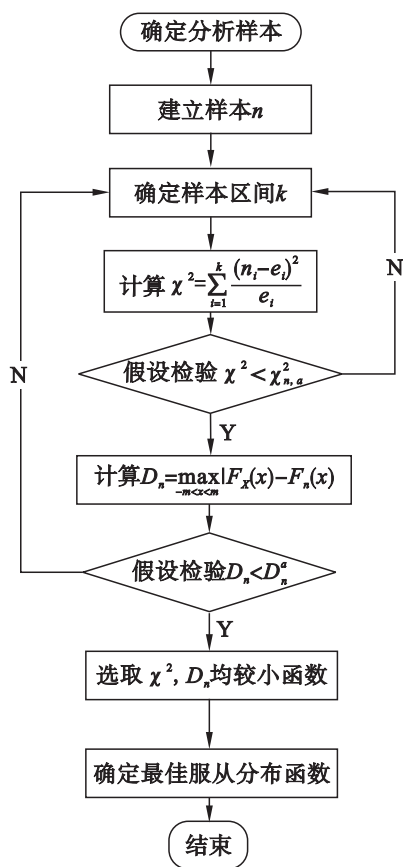


图 1 流程图
Fig. 1 Flow diagram

2 裂隙宽度概率统计分析

2.1 工程概况

本研究选取辽阳石门硅石矿岩质滑坡稳定性分析项目作为实际工程依托, 该边坡主要开采硅石(石英岩)作为建筑材料, 台阶式露天开采是采矿的主要形式. 硅石矿赋存于元古界震旦系的一套沉积岩经不同变质作用形成的与变质岩互层的软硬相间岩组中. 该矿山台阶在开采过程中出现了明显的变形滑动, 主滑方向为 126°, 每级台阶均可见大型后缘拉张裂隙. 而边坡表面存在大量的原生陡倾柱状节理、近水平层面及次生卸荷裂隙, 不连续面起伏形态多为波浪或平直状, 填充物多为风化泥、碎屑及碎块并存, 填充度 30% ~ 60%. 岩体结构呈现上硬下软厚层状块裂缓倾顺层结构.

将研究区边坡分为 6 级台阶, 分别记为 0 ~ 5 号, 每个台阶平均高约 10 m, 宽近 20 m, 台阶面近于 0°, 台阶坡度约为 60°, 平均走向为 N25°E. 对 6 级台阶分别作了节理裂隙窗口调查统计, 共统计裂隙 443 条. 根据裂隙的产状及成因, 进行了优势分组^[10], 为 3 个优势组, 平均产状为: 第一优势组

20.9°∠83°(柱状节理),第二优势组 129.3°(近水平节理),分组结果如图 2 所示。
∠74.2°(柱状节理),第三优势组 120.5°∠24.9°

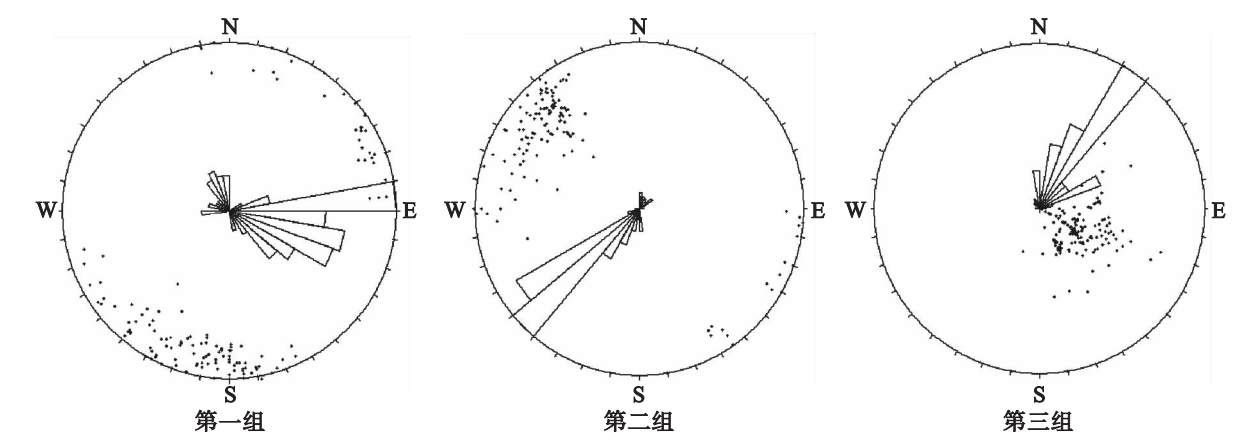


图 2 优势分组节理极点玫瑰花图
Fig. 2 Rose diagrams of advantage groups joint pole

2.2 模型的建立与参数选取

岩体的变形是斜坡岩体在重力作用下向临空面方向的侧向变形的结果,不同方向的结构面张开的宽度可能是不同的,因此本文以优势分组后的裂隙优势组为单位进行研究.对于进行节理裂隙窗口统计的 443 条裂隙,去掉某些临空面,共统计节理宽度样本数据 394 条.其中 6 个台阶第一优势组共 114 条,第二优势组共 125 条,第三优势组共 155 条.

由于本次样本容量较大,样本宽度分布的概率密度分布未知.分别假设样本概率密度分布函数为前文所提 8 种常见概率密度分布函数,利用 Matlab 自编程序,根据前文所介绍的计算步骤,通过调整样本的分布区间与积分步长,对 8 种常见分布函数进行卡方检验与 K-S 检验.一般工程上可接受 95% 的可信度,故本文选取置信区间 $\alpha=0.05$.在接受假设检验的基础上,综合比较 χ^2 值与 D_n 值,选取最佳服从分布函数.

2.3 裂隙宽度概率密度分布拟合结果

由上述方法对裂隙宽度样本进行了概率密度分布拟合.由于野外实际测量原因,有些台阶分组后裂隙数量较少,不适合进行概率密度函数拟合,故在研究中对于分组后裂隙条数少于 7 条的裂隙,仅给出其裂隙宽度平均数、方差及标准差.拟合结果见表 1,表 1 中第 1 列代表裂隙所属台阶号与分组后的组别,例如 0-1 代表 0 号台阶第 1 优势组.为了更直观体现裂隙宽度总体的分布规律,表 1 的第 2 部分是对野外调查所有裂隙统一进行优势分组后的概率密度分布拟合.

总裂隙各组概率密度分布拟合曲线见图 3 ~

图 5.

2.4 网络系统中裂隙宽度概率分布特征

虽然在假设检验中,设立了 8 种假设分布函数,但最终结果仅出现了其中的 4 种,即,伽马分布、指数分布、正态分布和对数正态分布,这几种分布函数的概率密度曲线均为单峰值曲线,且左右不对称.也就是说,对于岩体网络系统中的裂隙,其宽度主要集中在一个值附近.根据所统计数据及图 3 ~ 图 5 可知,其峰值均出现在 10 mm 以下,即在该滑坡裂隙系统中,小于 10 mm 的裂隙占大多数.

由表 1 可知,伽马分布占拟合结果的 10/13,而整合了整个滑坡 6 个台阶所统计的所有裂隙宽度进行分组后,也表明了伽马分布是裂隙宽度概率分布中的最常见的分布,因此可以认为,该滑坡岩体裂隙网络中裂隙宽度分布符合伽马分布.伽马分布是一种综合了指数分布和幂分布特点的常见分布函数,对于一个广义集合来说,如果变量的代数平均数和几何平均数一定,而其复杂程度最大,那么集合的概率分布即符合伽马分布函数^[11].一个滑坡的裂隙,在其受到的构造应力一定的情况下,裂隙宽度数据的平均值基本是一定的,而单个裂隙的宽度具有很强的不确定性,即复杂程度很大,因此符合伽马分布的规律.在伽马分布函数中,有两个参数 α 与 β , α 称为形状参数, β 称为尺度参数,当 $\alpha \leq 1$ 时,曲线呈单调下降趋势, β 值控制曲线与原点的接近程度, β 值越大,曲线越接近原点.对于进行概率密度拟合的 13 组数据,除少数样本数较少的拟合结果 $\alpha > 1$,多数数据及所有台阶的裂隙宽度整体数据 α 均小于 1,而 β 值由于优势组数的不同而具有一定差别.

表 1 分组裂隙宽度概率分布拟合结果
Table 1 Fitted results for the distribution of grouped fracture widths

台阶组号	个数	χ^2 检验		K-S 检验		分布类型	参 数	统计值		
		χ^2 值	自由度	K-S 值	自由度			均值	方差	标准差
0-1	72	11.667	8	0.062	11	伽马	$\alpha = 1.033, \beta = 10.664$	11.014	117.45	10.837
0-2	74	36.428	8	0.099	10	指数	$\mu = 10.000$	10.000	63.863	7.99
0-3	6	-	-	-	-	-	-	4.167	8.167	2.856
1-1	37	21.932	9	0.084	11	指数	$\mu = 5.108$	5.108	22.321	4.725
1-2	32	43.337	7	0.128	10	伽马	$\alpha = 0.234, \beta = 10.064$	7.047	211.861	14.555
1-3	5	-	-	-	-	-	-	9.000	17.500	4.183
2-1	24	17.393	7	0.139	10	伽马	$\alpha = 0.213, \beta = 10.355$	2.208	22.868	4.782
2-2	9	27.530	6	0.320	9	伽马	$\alpha = 2.766, \beta = 0.763$	2.111	1.611	1.269
2-3	4	-	-	-	-	-	-	7.250	74.250	8.617
3-1	17	33.679	9	0.148	12	对数正态	$\alpha = 0.080, \beta = 1.138$	2.071	11.383	3.374
3-2	21	17.587	7	0.285	10	伽马	$\alpha = 0.141, \beta = 28.275$	4.000	113.10	10.635
3-3	12	28.308	7	0.318	10	伽马	$\alpha = 0.212, \beta = 6.041$	1.283	7.752	2.784
4-1	7	-	-	-	-	-	-	1.571	0.952	0.976
4-2	19	37.356	5	0.118	8	伽马	$\alpha = 2.597, \beta = 0.932$	2.421	2.257	1.502
4-3	10	20.522	6	0.200	9	正态	$\mu = 2.597, \sigma^2 = 1.111$	2.000	1.111	1.054
5-1	18	15.658	7	0.203	10	伽马	$\alpha = 0.287, \beta = 34.835$	10.000	348.353	18.664
5-2	5	-	-	-	-	-	-	15.200	12.700	3.563
5-3	23	12.367	7	0.176	10	伽马	$\alpha = 1.022, \beta = 6.255$	6.391	39.976	6.322
总-1	114	19.209	7	0.018	10	伽马	$\alpha = 0.277, \beta = 16.231$	4.502	73.068	8.548
总-2	125	20.346	7	0.040	10	伽马	$\alpha = 0.651, \beta = 12.665$	8.245	104.421	10.219
总-3	155	22.846	7	0.043	10	伽马	$\alpha = 0.662, \beta = 12.562$	7.654	88.488	9.408

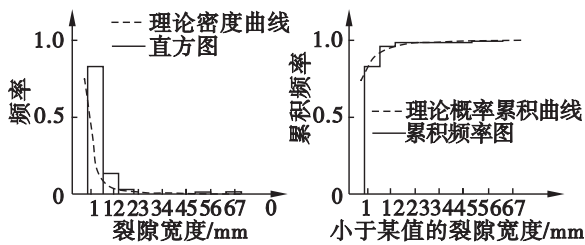


图 3 总裂隙第一组概率密度分布拟合曲线
Fig. 3 Probability density distribution curve of total fractures of group 1

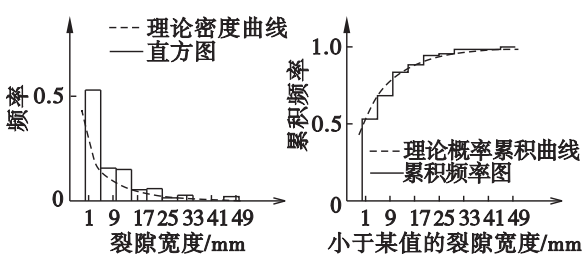


图 5 总裂隙第三组概率密度分布拟合曲线
Fig. 5 Probability density distribution curve of total fractures of group 3

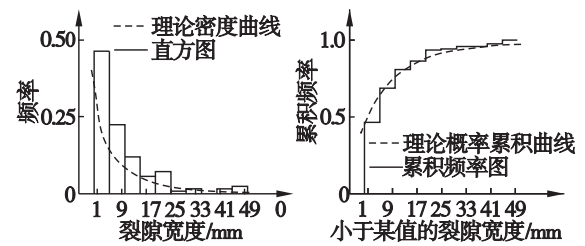


图 4 总裂隙第二组概率密度分布拟合曲线
Fig. 4 Probability density distribution curve of total fractures of group 2

对于分组后的裂隙来说,第一优势组为陡倾角裂隙,其走向与滑坡主滑方向基本一致,是一组由于滑动错动引起的剪切裂隙.因此对其裂隙宽度进行概率密度拟合后,其平均值较小,集中在 4.502 mm 附近,伽马分布的形状参数 α 较小,曲线形状较陡峭,尺度参数 β 较大,曲线较接近原点,这是由于在滑坡岩体滑动过程中其剪切错动所引起的裂隙张开宽度不大.第二优势组为一组在滑坡滑移-压拉裂过程中形成的陡倾角张性裂

隙,裂隙宽度平均值为 8.245 mm,伽马分布的尺度参数 β 较小,曲线距原点较远,这是由于滑坡岩体在拉张应力的作用下所形成的裂隙宽度一般较大.第三优势组为一组近层面裂隙,该组裂隙宽度平均值为 7.654 mm, β 值与第二组较接近,这是由于该滑坡在后期滑移的过程中沿层面拉裂形成的.根据以上规律可以认为,影响岩体裂隙网络系统裂隙宽度分布参数的主要因素为构造应力类型,在确定了应力类型后,便可简化选取适当参数,确定分布函数,从而将裂隙宽度应用到岩体不连续面三维网络数值模拟模型中.

3 结 论

1) 在对本工程各台阶裂隙宽度进行概率密度拟合研究后,选取最佳分布函数,其中伽马分布占 10/13,伽马分布是裂隙宽度概率密度分布中最常见的分布.

2) 决定裂隙宽度分布函数参数的主要因素为裂隙受力类型,在确定了裂隙受力性质后,便可简化其参数选取过程,确定分布函数.

3) 在对岩体裂隙网络系统宽度进行概率统计分析后发现裂隙宽度分布规律性较强,可将其应用于岩体不连续面三维网络数值模拟模型中.

4) 对于本工程进行统计的 443 条裂隙确定的宽度概率分布函数,虽有一定的参考意义,但缺乏更多实际工程验证,因此应当进一步总结更多工程统计数据对该结论进行验证.

参考文献:

- [1] Priest S D, Hudson J. Discontinuity spacings in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1976, 13: 135 – 148.
- [2] Barton C M. Geotechnical analysis of rock structure and fabric in CSA Mine NSW [C]//Applied Geomechanics Technical Paper 24. Melbourne, 1977: 29 – 30.
- [3] Einstein H H, Benezinano D, Baecher G B, *et al.* The effect of discontinuity persistence on rock slope stability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1983, 20(5): 227 – 236.
- [4] Kulatilake P H S W. Joint network modeling with a validation exercise in Stripa Mine Sweden [J]. *International Journal of Rock Mechanics Science & Geomechanical Abstract*, 1993, 30: 503 – 526.
- [5] Robertson A M. The interpretation of geological factors for use in slope theory [C]//Planning Open Pit Mines. Cape Town: Balkema, 1970: 55 – 71.
- [6] 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, 23(4): 398 – 403.
(Chen Jian-ping, 3D network numerical modeling technique for random discontinuities of rockmass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 398 – 403.)
- [7] Barton N, Bandis S. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joint [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1985, 22(3): 121 – 140.
- [8] 周创兵, 叶自桐, 何炬林, 等. 岩石节理张开度的概率模型与随机模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3): 267 – 272.
(Zhou Chuang-bing, Ye Zi-tong, He Ju-lin, *et al.* Probabilistic model and stochastic simulation for aperture of rock joints [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 267 – 272.)
- [9] 赵芳, 王卫星, 金文标. 基于角点分段算法的岩石裂隙宽度测量及分析[J]. *计算机应用研究*, 2006, 11(4): 137 – 140.
(Zhao Fang, Wang Wei-xing, Jin Wen-biao. Rock fracture width measurement method based on corner segment algorithm [J]. *Application Research of Computer*, 2006, 11(4): 137 – 140.)
- [10] 陈剑平, 尚晓春, 卢波, 等. 岩体随机不连续面优势组数划分[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(sup): 86 – 92.
(Chen Jian-ping, Shang Xiao-chun, Lu Bo, *et al.* A delineation of orientation data randomly distributed in rock mass [J]. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 2001, 28(sup): 86 – 92.)
- [11] Alzaatreh A, Famoye F, Lee C. The gamma-normal distribution: properties and applications [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2014, 69(1): 67 – 80.