

## K-S 检验在裂隙岩体统计均质区划分中的应用

阮云凯, 陈剑平, 曹琛, 闫欢  
(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘 要:** 采用 K-S 检验法, 提出考虑裂隙岩体迹长的新方法划分岩体的统计均质区, 计算对比样本各属性的累积频率、K-S 统计量和 K-S 临界值, 从而验证对比样本之间的显著性差异, 以此实现了对裂隙岩体的统计均质区的划分。通过对云南省马吉水电站左岸坝肩某一高程相邻两个平洞不同风化带的岩体结构统计均质区划分, 计算结果表明, 相邻两个平洞在弱风化下限、微风化及新鲜岩带内具有统计相似性, 可以划分为统计均质区, 而在弱风化上限不具有统计相似性; 单个平洞在各个风化带内不具有统计相似性。此外, 该方法可以运用到小样本裂隙的统计均质区划分中。

**关 键 词:** 裂隙岩体; 统计均质区; K-S 检验法; 随机数学; 裂隙迹长

**中图分类号:** TU 457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)10-1471-05

## Application of K-S Test in Structural Homogeneity Dividing of Fractured Rock Mass

RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, CAO Cen, YAN Huan

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: RUAN Yun-kai, E-mail: ruanyunkai@163.com)

**Abstract:** Based on K-S test, a new method was proposed to identify statistically homogeneous regions in a fractured rock mass by considering trace length of joints. The cumulative frequencies of each attribute of contrasting samples, the K-S statistical quantity and the K-S critical values were calculated to validate the significant difference between the comparative samples, based on which, the structural homogeneity of fractured rock mass was divided. This method was used to analyze the effect of the trace length on statistically homogeneity division in the fractured rock mass at two adjacent adits in different weathered zone at the Maji dam site on the left bank of the Nu River in Yunnan province. It was calculated that the rock mass at two adjacent adits shows statistical similarity in the lower limit of weak weathering, slightly weathering and fresh rock zones, and can be divided into statistically homogeneous areas, however it shows no statistical similarity in the upper limit of weak weathering. The rock mass at a single adit shows no statistical similarity in the every division of weathering. In addition, the proposed method can be applied to identify the dividing of joint samples with small sizes.

**Key words:** fractured rock mass; statistical homogeneity of rock mass structure; K-S test; stochastic mathematics; trace length of joints

岩体中大量存在不同地质成因的结构面, 这些结构面不仅导致了岩体力学性能的不连续性、非均匀性和各向异性, 而且在很大程度上控制着岩体在一定荷载条件下的变形破坏方式和强度特

性。在从现场调查来看, 岩体中分布着变化的不连续结构面, 表现为两个不同的地质单元的地质力学、地质和水文地质的性质是存在差异的<sup>[1]</sup>。岩体的不连续性受到其岩性、产状、裂隙间距、迹长、

收稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41330636); 国家自然科学基金资助项目(41402242, 41402243); 吉林大学研究生创新基金资助项目(2014062)。

作者简介: 阮云凯(1989-), 男, 福建建阳人, 吉林大学博士研究生; 陈剑平(1957-), 男, 福建南平人, 吉林大学教授, 博士生导师。

不连续面的粗糙度、充填物质等因素的影响. 从统计意义上分析, 地质单元之间不同的产状、迹长, 其变形和破坏机制存在显著性差异. 因此, 有必要将具有“类似”参数的地质单元体划分为一个相同的统计均质区.

目前, 国内外研究岩体统计均质区方面的工作还不多<sup>[2-9]</sup>. Miller<sup>[2]</sup>提出施密特图关联表分析方法, 用不连续面产状成功地划分了岩体统计均质区. Mahtab 等<sup>[3]</sup>考虑将不连续面的产状数据投影到单位圆上; 后来, Kulatilake<sup>[4]</sup>进一步研究统计均质区并加以丰富. 陈剑平等<sup>[5]</sup>在 Miller 方法上加以改善, 并应用于实际工程即三峡永久船闸洞室围岩的统计均质区的划分研究上. Kulatilake 等<sup>[6]</sup>考虑结构面密度和结构面尺寸分布, 采用盒维数的方法, 对裂隙进行分形计算, 借此划分统计均质区. Martin 等<sup>[7]</sup>基于 Mahtab 和 Yegulalp 方法, 用相关系数法进行相似性判别. 文献[8-9]考虑结构面产状、张开度和起伏形态, 采用列联表和卡方检验方法, 进行统计均质区划分.

迄今为止, 大多学者都是利用不连续面的产状对岩体统计均质区进行划分, 却很少考虑裂隙岩体另一个重要参数即裂隙迹长. 故本文重点介绍裂隙迹长在裂隙岩体统计均质区划分中的应用. 大量实践证明: 相同产状、不同裂隙迹长在岩体变形破坏中具有显著差异, 故通过 K-S 检验, 利用裂隙迹长来划分统计均质区很有意义.

## 1 K-S 方法介绍

K-S 检验作为非参数检验常用方法之一, 是一种拟合优度检验法. K-S 检验法用于描述两个独立统计样本的相似性, 其零假设为两个样本服从相同的分布. 这种检验主要是将理论分布下的累积频数分布与观察到的累积频数分布相比较, 如果两个样本间的累积概率分布的离差很大, 这就意味着两样本来自不同的总体, 就应拒绝  $H_0$ .  $H_0$  表示样本所来自的总体分布服从某特定分布. K-S 检验统计量  $D_{m,n}$  的计算式为

$$D_{m,n} = \max | [S_m(x) - R_n(x)] |. \quad (1)$$

式中:  $S_m(x)$  和  $R_n(x)$  为两个样本的累积分布函数,  $m, n$  为各个样本的容量.

K-S 检验方法步骤:

1) 假设  $H_0: S_m(x) = R_n(x)$ ;  $H_1: S_m(x) \neq R_n(x)$ .

2) 给定显著性水平  $\alpha$ , 样本容量为  $m, n$ .

3)  $H_0$  的拒绝域为  $D_{m,n} \geq D_{m,n,\alpha}$  (当  $m = n$  时, 查附表得  $D_{m,n,\alpha}$  值; 当  $m \neq n$  时, 可由 Kolmogonov 分布函数:

$$k(x) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k \exp(-2k^2 x^2), & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$k\left(\sqrt{\frac{mn}{m+n}} D_{m,n,\alpha}\right) \approx 1 - \alpha, \quad (3)$$

近似求出  $D_{m,n,\alpha}$  的值.

4) 把两组样本分别进行升序排列, 计算出累积频数分布 (对比样本用相同的间隔或分类, 并利用尽可能多的间隔). 然后, 计算出检验统计量  $D_{m,n}$  值. 如果  $D_{m,n} \geq D_{m,n,\alpha}$ , 则拒绝  $H_0$ ; 否则接受  $H_0$ .

K-S 临界值可在给定置信区间确定后, 查 Kolmogonov 分布函数表获得.  $\alpha$  可根据实际情况选取, 一般工程上  $\alpha$  取 0.5 即可. 考虑到 K-S 检验的准确性, 样本划分间隔尽可能多, 一般取 15 组左右为宜.

根据 K-S 统计量  $D_{m,n}$  和临界值  $D_{m,n,\alpha}$  的相对大小可判断研究样本之间的差异情况. 若  $D_{m,n} \geq D_{m,n,\alpha}$ , 则拒绝原假设  $H_0$ , 即两样本存在“显著性”差异; 反之, 接受原假设  $H_0$ , 即两样本不存在“显著性”差异.

## 2 工程概况

本文以云南省马吉水电站工程为依托, 选取在左岸某高程两个相邻平洞中获取的裂隙迹长为研究对象, 工程位置平面图如图 1 所示. 坝址两岸谷坡陡峻、山体雄厚, 河谷呈对称的“V”字型. 坝址区岩性主要为混合片麻岩和混合花岗岩.



图 1 坝址区地形地貌

Fig. 1 Geomorphology and geology of dam site

拟建为混凝土双曲拱坝, 最大坝高为 290 m,

正常蓄水位为 1 570 m. 两岸大部基岩裸露, 岩性为混合片麻岩、混合花岗岩, 内夹斜长角闪变粒岩透镜体. 岩体中以 NE60° ~ 80° 为优势结构面, 多陡倾、缓倾结构面不发育, 多在卸荷带内左岸 NE 向断层较发育, 且密度较大, 与拱坝近于正交, 对坝肩变形不利; NE 向断层和 NW 向的结构面可形成侧向切割面和拉裂面, 但由于没确定的底滑面, 缓倾山外的结构面仅在卸荷带内发育, 对抗滑稳定较有利.

本文选取的研究对象的二维迹线图如图 2 所示. 岩体风化大致分为强风化 (研究区域不发

育)、弱风化 (分为弱上、弱下)、微风化、新鲜岩. 统计均质区针对岩体裂隙进行统计分析, 应该首要考虑确定性的结构面, 因为其往往规模大且稳定, 它们对岩体结构特性的贡献是显著的. 但确定性结构面的统计与评价是相对容易的, 因为其少且确定, 此外随机结构面对岩体结构的影响是不可忽视的, 但对随机结构面的统计与评价, 由于其随机性的特征, 使得对其评价比确定性结构面的评价难度大大增加, 故通常把评价的重点放在随机结构面上. 因此, 本文统计均质区的划分主要考虑现场实测得到的裂隙情况.

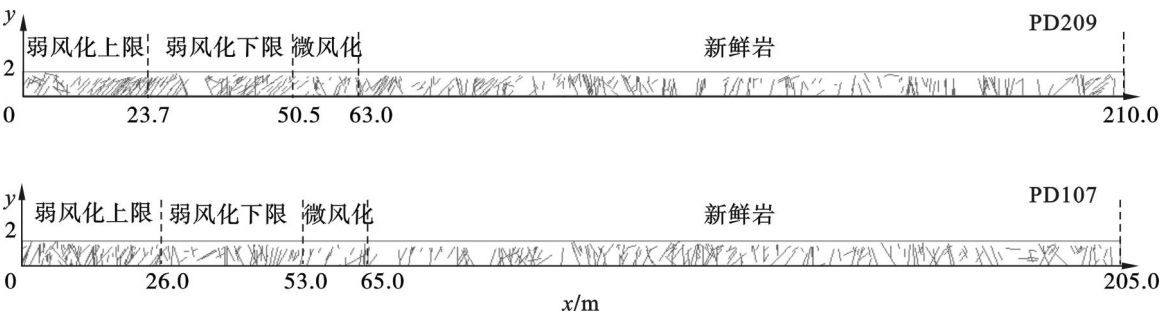


图 2 二维迹线图  
Fig. 2 Two dimensional trace map

3 统计均质区划分

采用 K - S 检验法建立考虑裂隙迹长划分统计均质区的方法. 本文首先考虑了马吉水电站坝肩某一高程相邻两个平洞分别在弱风化上限、弱风化下限、微风化、新鲜岩体区域内统计均质区的划分, 然后, 考虑到岩体的空间效应, 在分别考虑单个平洞在不同分划界限内统计均质区的划分. 这样分别从横向和纵向上考虑利用裂隙迹长对平洞进行统计均质区的划分, 从而计算统计均质区, 验证方法的合理性. 通过样本比较, 判断两个样本是否存在“显著差异”. 如果两个样本具有统计相似性, 即“无显著差异”, 两个样本的 K - S 检验统计量小于临界值, 可以将比较的两个区间合并为一个统计均质区. 统计均质区具体的计算步骤如下.

1) 选择对比样本. 考虑到平洞岩体的分化情况, 故将每个平洞划分为四个区域: 弱风化上限、弱

风化下限、微风化、新鲜岩, 具体参数如表 1 所示. 建立 PD209 和 PD107 分别在不同风化界限区域内及单个平洞分别在不同分化界限区域内共计 10 个待对比样本.

2) 确定裂隙属性内累积频率. 分别将 PD209 (0 ~ 23.7 m) 和 PD107 (0 ~ 26 m) 内裂隙的迹长进行升序排列, 然后确定其迹长分布区间, 并将迹长划分为  $n$  个区间,  $n$  越大结果越精确. 本文将迹长划分为 0 ~ 0.2, 0.2 ~ 0.4, 0.4 ~ 0.6, ..., 2.8 ~ 3.0, > 3.0 cm 共计 16 个区间. 确定裂隙迹长在上述各个区间内的累积频率. 建立 K - S 检验数据表, 表 2 为弱风化上限 PD209 (0 ~ 23.7 m) 和 PD107 (0 ~ 26 m) 内裂隙的样本.

3) 计算 K - S 检验统计量和临界值, 确定样本间是否具体统计相似性.

计算各区间内的累积频率, 结果如表 2 所示, 累积频率分布图如图 3 所示. 然后, 求出 K - S 统计量  $D_{m,n} = 0.361$ , 取置信区间为 0.05, 由

表 1 不同平洞在不同分化界限的参数  
Table 1 Parameters of dividing in each adit

平洞 编号	弱风化上限		弱风化下限		微风化		新鲜岩	
	水平风化距离/m	裂隙条数	水平风化距离/m	裂隙条数	水平风化距离/m	裂隙条数	水平风化距离/m	裂隙条数
PD209	0 ~ 23.7	53	23.7 ~ 50.5	71	50.5 ~ 63.0	27	63.0 ~ 210.0	215
PD107	0 ~ 26.0	64	26.0 ~ 53.0	43	53.0 ~ 65.0	15	65.0 ~ 205.0	214

表 2 K-S 检验数据表  
Table 2 Table of K-S test

样 本/cm	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 1.2	1.2 ~ 1.4	1.4 ~ 1.6
PD209	0	0	0	4	3	5	2	4
PD107	0	4	10	10	4	6	6	1

样 本/cm	1.6 ~ 1.8	1.8 ~ 2.0	2.0 ~ 2.2	2.2 ~ 2.4	2.4 ~ 2.6	2.6 ~ 2.8	2.8 ~ 3.0	> 3.0
PD209	4	1	9	5	2	4	0	10
PD107	2	6	2	6	0	1	1	5

$$D_{m,n,0.05} = 1.36 * \sqrt{\frac{m+n}{mn}}, \tag{4}$$

计算求出 K-S 临界值  $D_{m,n,0.05}$  为 0.253 ,显然  $D_{m,n} > D_{m,n,0.05}$  ,所以,样本 PD209 和 PD107 内裂隙不具有统计相似性,故 PD209 和 PD107 在弱风化上限不是统计均质区.

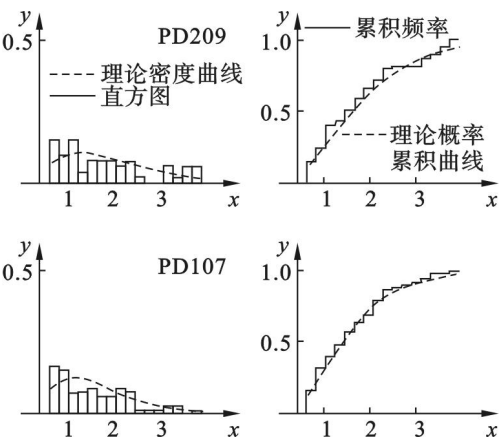


图 3 迹长概率密度分布拟合曲线  
Fig. 3 Probability density distribution curves of trace length

4) 改变对比样本. 将样本PD209和PD107

重复重复 2) ~ 3) ,判断样本是否具有统计相似性,是否能合并为一个统计均质区. 计算求出 K-S 临界值  $D_{m,n,0.05}$  为 0.253 ,显然  $D_{m,n} > D_{m,n,0.05}$  ,所以,样本 PD209 和 PD107 内裂隙不具有统计相似性,故 PD209 和 PD107 在弱风化上限不是统计均质区.

5) 重复 1) ~ 4) ,直至将剩下的 9 个样本进行统计均质区的划分确定为止.

通过以上步骤,可以分别计算出在置信区间  $\alpha=0.05$  的情况下,各个样本之间的 K-S 检验统计量  $D_{m,n}$  和 K-S 临界值  $D_{m,n,0.05}$  如表 3 所示. 显然, ( 23.7 ~ 50.0 m ) 与 ( 26.0 ~ 53.0 m ) , ( 50.5 ~ 63.0 m ) 与 ( 53.0 ~ 65.0 m ) , ( 63.0 ~ 210.0 m ) 与 ( 65.0 ~ 205.0 m ) K-S 统计量  $D_{m,n}$  小于临界值  $D_{m,n,0.05}$  ,满足样本相似性的要求,即接受假设  $H_0$  ,可认为二者在统计意义上是均质的. 将满足 K-S 检验的样本合并为一个统计均质区,最终可得 ( 23.7 ~ 50.0 m ) 与 ( 26.0 ~ 53.0 m ) 为统计均质区 1, ( 50.5 ~ 63.0 m ) 与 ( 53.0 ~ 65.0 m ) 为统计均质区 2, ( 63.0 ~ 210.0 m ) 与 ( 65.0 ~ 205.0 m ) 为统计均质区 3,如图 4 所示.

表 3 对比样本 K-S 检验结果表  
Table 3 Result of K-S test between comparative samples

对比样本	显著性水平	临界值 $D_{m,n,0.05}$	统计量 $D_{m,n}$	是否统计均质区
( 0 ~ 23.7 m ) 与 ( 0 ~ 26.0 m )	0.05	0.253	0.361	否
( 23.7 ~ 50.5 m ) 与 ( 26.0 ~ 53.0 m )	0.05	0.263	0.093	是
( 50.5 ~ 63.0 m ) 与 ( 53.0 ~ 65.0 m )	0.05	0.438	0.074	是
( 63.0 ~ 210.0 m ) 与 ( 65.0 ~ 205.0 m )	0.05	0.131	0.127	是
( 0 ~ 23.7 m ) 与 ( 23.7 ~ 50.5 m )	0.05	0.247	0.247	否
( 23.7 ~ 50.5 m ) 与 ( 50.5 ~ 63.0 m )	0.05	0.307	0.307	否
( 50.5 ~ 63.0 m ) 与 ( 63.0 ~ 210 m )	0.05	0.275	0.326	否
( 0 ~ 26.0 m ) 与 ( 26.0 ~ 53.0 m )	0.05	0.268	0.269	否
( 26.0 ~ 53.0 m ) 与 ( 53.0 ~ 65.0 m )	0.05	0.408	0.428	否
( 53.0 ~ 65.0 m ) 与 ( 65.0 ~ 205.0 m )	0.05	0.363	0.367	否



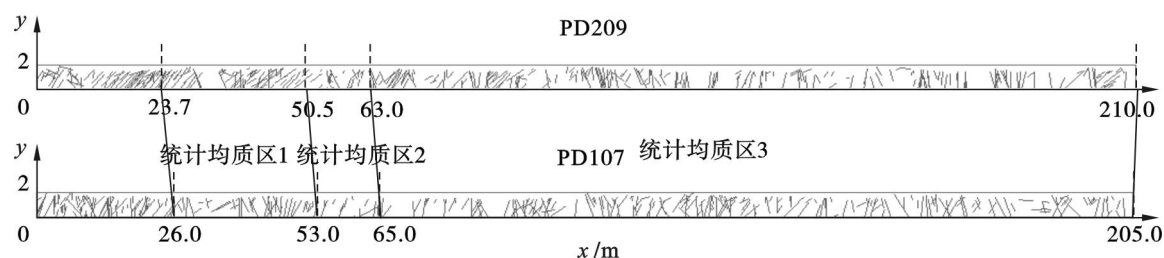


图4 统计均质区划分

Fig. 4 Statistical homogeneity dividing of rock mass structure

## 4 结 论

1) 基于 K-S 检验法考虑裂隙迹长对裂隙岩体进行统计均质区的划分,可有效解决工程实际问题.

2) 计算得出相邻两个平洞在弱风化下限、微风化及新鲜岩带内具有统计相似性,可以划分为统计均质区,而在弱风化上限不具有统计相似性.单个平洞在各个风化带内不具有统计相似性,结合现场地质现象分析,这与实际相符,验证了这种方法的准确性.

3) 所提方法可以运用到小样本裂隙的统计均质区划分,因为 K-S 检验法对样本大小没有严格要求.

4) 文中仅考虑了裂隙迹长对统计均质区的划分,然而不连续面的产状、宽度、不连续面充填程度、含水情况等因素对统计均质区划分仍有一定的影响,如将这些因素综合考虑来划分统计均质区,将会使划分结果更加准确.另外,尽管文中提出的考虑裂隙迹长划分统计均质区有一定的工程意义且方法简单,但是人为因素较大,尚未建立很好的体系,仍需要今后进一步深入探讨.

## 参考文献:

- [1] 陈剑平,肖树芳,王清,等. 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, et al. 3D network computer modeling theory of randomly distributed discontinuities [M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1995.)
- [2] Miller S M. A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations [J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15 (2): 317 - 328.
- [3] Mahtab M A, Yegulalp T M. A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics [C] // Proceedings of the 25th US Symposium on Rock Mechanics. New York, 1984: 495 - 502.
- [4] Kulatilake P H S W. Analysis of structural homogeneity of rock mass [J]. *Engineering Geology*, 1990, 29 (4): 195 - 211.
- [5] 陈剑平,王清,肖树芳,等. 岩体结构统计均质区的划分 [J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7 (1): 19 - 24.  
(Chen Jian-ping, Wang Qing, Xiao Shu-fang, et al. Evaluation of statistical homogeneity of rock mass structural [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1996, 7 (1): 19 - 24.)
- [6] Kulatilake P H S W, Fiedler R, Panda B B. Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses [J]. *Engineering Geology*, 1997, 148: 217 - 229.
- [7] Martin M W, Tannant D D. A technique for identifying structural domain boundaries at the EKATI diamond mine [J]. *Engineering Geology*, 2004, 74: 247 - 264
- [8] 张文,陈剑平,刘存合. 卡方检验在裂隙岩体统计均质区划分中的应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (9): 1440 - 1446.  
(Zhang Wen, Chen Jian-ping, Liu Cun-he. Application of Chi-square test in structural homogeneity dividing of fractured rock mass [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33 (9): 1440 - 1446.)
- [9] Li Y Y, Wang Q, Chen J P, et al. Identification of structural domain boundaries at the Songta dam site based on nonparametric tests [J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 177 - 184.