

DOI: 10.11779/CJGE201607015

基于 WLSM 的多参数裂隙岩体统计均质区划分

阮云凯¹, 陈剑平¹, 李严严², 朱雷³, 曹琛¹, 占洁伟¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都, 610059)

摘要: 岩体统计均质区的划分一直是岩土工程领域研究的重要课题。大多学者采用产状或者其它单一参数划分岩体统计均质区, 却很少有人考虑多参数进行划分研究。考虑了产状、间距、张开、迹长和粗糙度共 5 个参数, 提出了一种划分裂隙岩体统计均质区的新方法, 即采用权的最小平方法确定参数的权重并用相关系数法计算研究区裂隙各个参数之间的相关性, 从而确定均质系数以此实现对裂隙岩体统计均质区的划分。通过工程实例即云南省马吉水电站左岸坝肩某一高程相邻 4 个平硐的岩体结构统计均质区划分, 分析了多参数对裂隙岩体统计均质区划分的影响。研究结果表明: 裂隙岩体统计均质区划分与裂隙产状、间距、张开、迹长和粗糙度等因素有关并成功划分了研究区的统计均质区, 证明了该方法的可行性。

关键词: 统计均质区; 多参数; 权的最小平方法; 相关系数法; 均质系数 (HI)

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)07-1277-06

作者简介: 阮云凯(1989-), 男, 福建建阳人, 博士研究生, 主要从事岩体结构及其工程地质稳定性方面的研究。E-mail: ruanyunkai@163.com。

Evaluation of statistical homogeneity of jointed rock masses based on weighted least-square method

RUAN Yun-kai¹, CHEN Jian-ping¹, LI Yan-yan², ZHU Lei³, CAO Cen¹, ZHAN Jie-wei¹

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. State Key Laboratory of Geological Hazards Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The identification of structural homogeneity has been an important topic in the field of geotechnical engineering. Most of scholars use joint orientations or the other joint parameters to identify statistically homogeneous regions or structural domains in a jointed rock mass. However, few studies have been conducted by integrating both of them. Five parameters are considered for this identification, namely: joint orientation, spacing, aperture, trace length and roughness. Based on the weighted least-square method, the weights of the parameters are obtained. A statistical parameter, known as the correlation coefficient, is used to quantify the degree of the similarity between the joint parameters collected from the studied regions. The overall homogeneity of the rock mass is determined based on the homogeneity index. A practical engineering case is analyzed, illustrating the effect of the multiple parameters collected from four adjacent adits at Maji dam site on the left bank of the Nujiang River in Yunnan Province on identification of statistical homogeneity in fractured rock mass. The results indicate that the identification of statistical homogeneity is influenced by many factors such as the joint orientations, spacing, aperture, trace length and roughness. The statistical homogeneous domains in the studied regions are successfully divided, indicating the feasibility of the proposed method.

Key words: statistical homogeneity; multiple joint parameters; weighted least-square method; correlation coefficient; homogeneity index

0 引言

岩体中发育大量裂隙, 这些裂隙的存在赋予岩体结构特性, 即各向异性、不连续性和非均质性。岩体裂隙的空间分布是变化的, 其表现为不同均质区内,

岩体的结构特征和地质力学特性存在差异。统计均质区是指在统计上具有相似岩体结构的区域^[1-2]。在构建

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41330636)

收稿日期: 2015-07-28

三维网络模拟时, 每个均质区应当用不同的裂隙地质模型来表征。因此, 在构建地质模型前划分岩体统计均质区是十分必要的。

目前, 国内外研究统计均质区的人比较少。Miller^[2]采用施密特图关联表法成功划分岩体统计均质区; 后来, Kulatilake 等^[3]进一步研究统计均质区并加以丰富; 陈剑平等^[4]运用修正的 Miller 方法成功划分三峡工程永久船闸附近隧道的岩体结构均质区; 范留明等^[5]提出了一种基于裂隙密度的岩体结构均质区划分方法, 并应用于西南某水电站工程中。

Martin 等^[6]基于 Mahtab 和 Yegulalp 方法, 用相关系数法进行相似性判别; 但 Martin 等只考虑了产状这个因素, 而 Kulatilake 等^[3]认为, 在同一统计均质区内, 裂隙的产状、间距、张开、粗糙度以及充填等参数均应具有相似分布。因此, 仅仅考虑产状或其他单个因素是远远不够的, 必须考虑多个参数来划分统计均质区^[3]。文献[7, 8]考虑裂隙产状(倾向、倾角)、张开度和起伏形态, 采用列联表和卡方检验方法, 成功划分统计均质区。但是, 这种方法存在不足, 它分开讨论裂隙产状的倾向和倾角。

本文提出的新方法是采用权的最小平方法来评价岩体结构统计均质区, 所考虑裂隙的 5 个因素即产状、间距、张开、迹长及粗糙度被认为是表征裂隙的主要特征^[9-11]。新方法是基于 Miller^[2]和 Martin 等^[6]的研究成果, 划分岩体结构统计均质区步骤如下: ①利用相关系数法计算裂隙各个参数的相似性; ②利用权的最小平方法确定各个参数的权重值; ③计算整体的相似性即通过各个参数的相似性系数乘以其权重, 而后再叠加。

1 研究方法

1.1 相关系数法的基本原理

相关系数法反映了两变量之间相互关系的密切程度。相关系数按积差方法计算, 以两变量与各自平均值的离差为基础, 两个离差相乘来反映两变量间的相关程度。通常相关系数法用以度量不同变量间存在相关关系的可能性。相关系数法的具体算法如下:

对于变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 和变量 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 之间的相关程度可以用相关系数 ρ_{xy} 表示:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i / n - \left(\sum_{i=1}^n X_i / n \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i / n \right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n X_i X_i / n - \left(\sum_{i=1}^n X_i / n \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n Y_i Y_i / n - \left(\sum_{i=1}^n Y_i / n \right)^2 \right]}}, \quad (1)$$

式中, X, Y 为随机变量, n 为变量的个数, 其中 $\rho_{xy} \in [-1, 1]$ ^[6, 12]。当 $\rho_{xy} = \pm 1$ 时, 说明 X, Y 两变量是理想的线性相关; 当 $\rho_{xy} = 0$ 时, 表示 X, Y 两变量之间完全无关。

1.2 权的最小平方法的权重计算

Chu 等^[13]提出了权的最小平方法 (WLSM), 它是层次分析法中的一种方法。传统层次分析法的计算过程主观性较强, 实际应用时需要人为不断进行尝试调整, 以达到“一致性检验”的要求。而权的最小平方法有效地避免了这一不足, 通过求解判断矩阵在特定约束条件下函数关系极小化解 ω_θ , 并将其作为最终的排序权向量, 使得计算过程大大简化, 同时获得与传统层次分析法同样有效的权重分析结果, 具体步骤如下:

(1) 建立判断矩阵 A

综合分析影响统计均质区多参数之间的相对重要程度, 进行两两比较后建立判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

判断矩阵 A 中各个元素, 按照表 1 的赋值标准进行取值。

表 1 指标重要程度量化赋值表

Table 1 Definition of comparative importance

| a_{ij} 取值 | 指标 i 相对于指标 j 重要程度描述 |
|-------------|--|
| 1 | 同等重要 |
| 3 | 稍重要 |
| 5 | 明显重要 |
| 7 | 强烈重要 |
| 9 | 极端重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 用 2, 4, 6, 8 分别表示相邻判断 1~3, 3~5, 5~7, 7~9 的中间值 |
| 倒数 | 若指标 i 相对于指标 j 重要程度取值为 a_{ij} , 则指标 j 相对于指标 i 重要程度取值为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ |

(2) 求解函数极小化解 ω_θ

函数关系为 $J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\omega_i - a_{ij} \omega_j)^2$, 约束条件为 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 极小化解 $\omega_\theta = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 。

根据王志仁^[14]对上述关系式的求解结果可知 ω_θ 的计算公式为

$$\omega_\theta = \frac{C^{-1}e}{e^T C^{-1}e} \quad (3)$$

式中,

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_{i1}^2 + n - 2 & -(a_{12} + a_{21}) & \cdots & -(a_{1n} + a_{n1}) \\ -(a_{21} + a_{12}) & \sum_{i=1}^n a_{i2}^2 + n - 2 & \cdots & -(a_{2n} + a_{n2}) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -(a_{n1} + a_{1n}) & -(a_{n2} + a_{2n}) & \cdots & \sum_{i=1}^n a_{in}^2 + n - 2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$e = (1, 1, \dots, 1)^T. \quad (5)$$

2 工程概况和数据处理

2.1 工程概况

本文以云南省马吉水电站工程为依托, 研究数据从怒江左岸某高程 4 个相邻平硐 (PD241, PD253, PD105 和 PD209) 中获取 (如图 1)。每一个平硐长约 200 m, 高和宽都约 2 m。木加甲坝址位于福贡县马吉乡上游约 7.1 km。初拟以 C2 线为混凝土双曲拱坝布置线, 设计坝高 300 m, 装机容量 4200 MW, 正常蓄水位 1570 m, 多年平均发电量 $189.7 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 为世界级高坝。

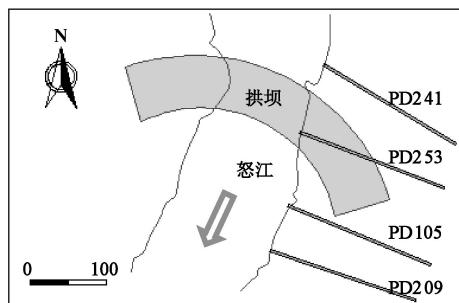


图 1 平硐位置

Fig. 1 Location of adits

坝址区属于深切峡谷地貌, 河谷形态呈“V”字型 (如图 2)。坝址两岸岸坡陡峻, 基本对称。坝址岩性主要为混合片麻岩和混合花岗岩, 岩质坚硬, 弱风化岩体较薄, 岩体较完整—完整, 其变形模量大于 18.0 GPa, 为高模量岩体。坝址河床部位未发现大的顺河向断裂, 缓倾角结构面不发育, 无不利结构面, 坝后抗力体未发现深切沟槽, 无临空面发育。因此, 河床坝基岩体具有较好的抗滑和抗变形能力。



图 2 坝址区地形地貌

Fig. 2 Geomorphology and geology of dam site

2.2 数据处理

(1) 产状数据

本文采用 Miller^[2]方法对裂隙产状进行加工处理。该方法是将施密特等面积投影图划分成若干个等面积小方格, 而后统计落入每个方格中裂隙极点数目并绘制四个平硐的裂隙产状极点图见图 3。

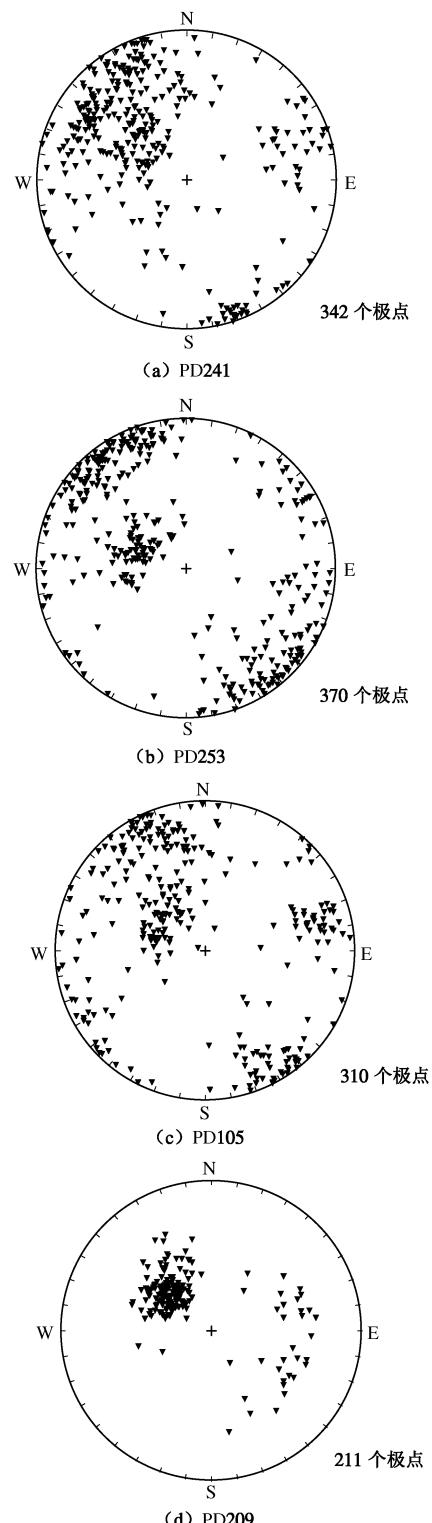


图 3 不同平硐的裂隙产状的上半球等面积极点图

Fig. 3 Upper hemisphere equal-area projections of joint orientations collected from each adit

表 2 裂隙多参数分级标准

Table 2 Classification of joint parameters

| 间距 | <60 mm | 60~200 mm | 200~600 mm | 0.6~2 m | >2 m |
|-----|---------|-----------|------------|---------|---------|
| 张开 | 闭合 | 0~0.1 mm | 0.1~1 mm | 1~5 mm | >5 mm |
| 迹长 | 0.5~1 m | 1~1.5 m | 1.5~2 m | 2~2.5 m | 2.5~3 m |
| 粗糙度 | 光滑 | 稍粗 | 粗糙 | 非常粗糙 | >3.5 m |

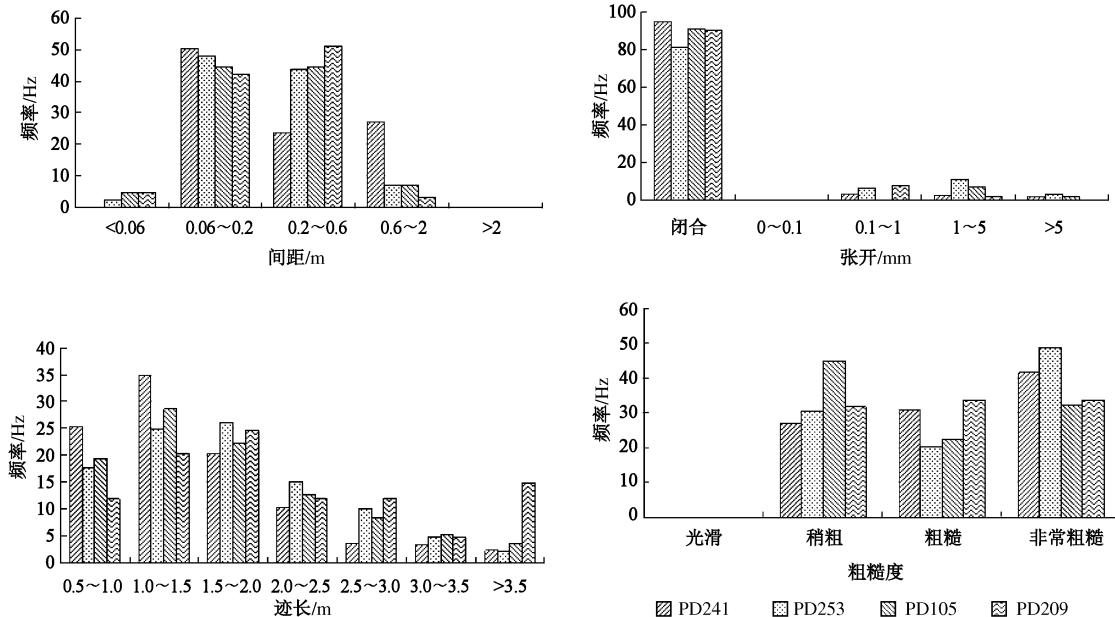


图 4 裂隙相关参数的频率分布

Fig. 4 Frequency distributions of parameters of joints collected from each adit

(2) 非产状数据

参考 Bieniawski^[15]的研究成果, 给出了结构面的间距、张开、迹长和粗糙度的划分标准 (表 2)。图 4 反映了这些参数的分布情况。

3 统计均质区划分

采用相关系数法建立起考虑多参数统计均质区划分的方法。具体计算步骤如下:

(1) 利用相关系数法计算裂隙各参数的相关性。

Martin 等^[6]指出, 当两个裂隙产状样本的相关系数接近为 1 时, 可以将它们化为一个统计均质区。参考 Cohen^[12]的研究成果, 利用相关系数将统计均质区划分为 5 个等级, 如表 3 所示。

表 3 均质区划分标准

Table 3 Classification of homogeneity level

| 相关系数 | <0.1 | 0.1~0.3 | 0.3~0.5 | 0.5~0.8 | 0.8~1.0 |
|------|------|---------|---------|---------|---------|
| 均质程度 | 不相关 | 低相关 | 中等相关 | 高相关 | 非常相关 |

裂隙产状的相关性计算是在 Miller 方法的基础上, 采用 34 个施密特网格划分 (图 5) 并比较裂隙产状落在相应极点图上发生的频率。为减少划分方格时人为因素的干扰, 以 10°为间隔对划分网格进行旋

转 (图 6), 并计算每一次旋转后的相关系数 ρ 值; 取 18 次旋转计算得到的平均 ρ 值作为最终的 ρ 值。其他裂隙参数的相关系数计算方法也是通过比较各裂隙参数落在相应参数分组范围内的频率。

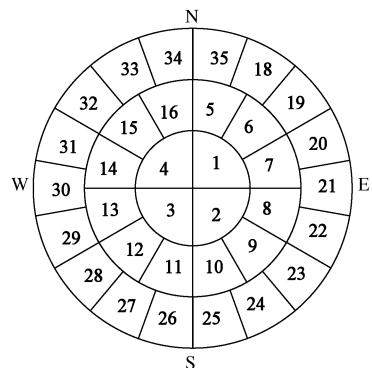


图 5 34 格划分方案

Fig. 5 34-sector network

从表 4 中看出, 就产状而言, PD241 和 PD253 ($\rho=0.6961$)、PD253 和 PD105 ($\rho=0.6393$) 有较高的统计相似性, 而 PD105 和 PD209 ($\rho=0.2570$) 统计相似性低下。因而, 将 PD241 和 PD253、PD253 和 PD105 分别划分一个统计均质区, 而 PD105 和 PD209 不属于统计均质区。然而, 表 4 中除产状外, 其他参

表 4 各平硐的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between adits

| 平硐编号 | 产 状 | | | 间距 | 张 开 | 迹长 | 粗糙度 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | | | | |
| PD241 和 PD253 | 0.6552 | 0.7331 | 0.6961 | 0.9806 | 0.9956 | 0.8676 | 0.9278 |
| PD253 和 PD105 | 0.6140 | 0.6604 | 0.6393 | 0.9165 | 0.9981 | 0.9596 | 0.7954 |
| PD105 和 PD209 | 0.1901 | 0.3057 | 0.2570 | 0.9025 | 0.9947 | 0.7052 | 0.8517 |

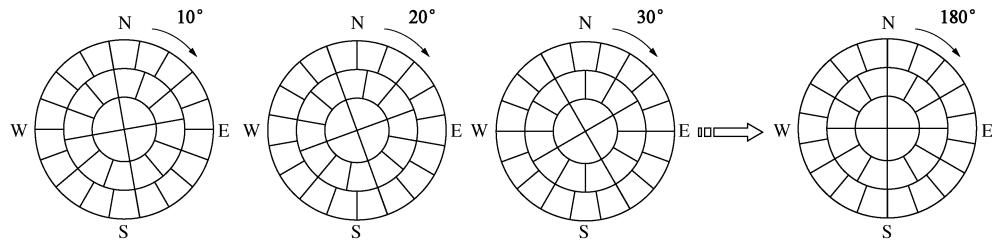


图 6 34 格划分方案旋转示意图

Fig. 6 Rotation maps of 34-sector network

数相关性系数较高。在进行侧裂面边界调查时, 由于左右岸可能构成的侧裂面只有一组, 其产状变化不大, 而水电工程中又非常重视坝肩侧裂面的连通率^[5], 因此在这种情况下, 单独考虑产状参数划分就显得不合理, 应该考虑多参数划分统计均质区。

(2) 参数权重的确定

本文考虑产状、间距、张开、迹长和粗糙度 5 个因素来划分统计均质区, 根据各因素重要性, 依次将其进行两两比较, 由式 (2) 建立判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/2 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式 (3) 计算可得 5 个参数的权重值, 见表 5 所示。

表 5 基于权的最小平方法统计均质区评价参数权重值

Table 5 Homogeneity evaluation parameter weights based on weighted least-square method

| 指标 | 产 状 | 间 距 | 张 开 | 迹 长 | 粗 糙 度 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 权 重 | 0.4708 | 0.1719 | 0.0764 | 0.1719 | 0.1090 |

由式 (4) 求解得中间矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} 4.32 & -3.33 & -5.2 & -3.33 & -4.25 \\ -3.33 & 14.36 & -3.33 & -2 & -2.5 \\ -5.2 & -3.33 & 51 & -3.33 & -2.5 \\ -3.33 & -2 & -3.33 & 14.36 & -2.5 \\ -4.25 & -2.5 & -2.5 & -2.5 & 28.25 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 均质系数确定

本文提出一种利用均质系数 (HI) 来划分统计均质区的新方法, 评价标准参照表 3, 计算公式如下:

$$HI = \sum_{i=1}^n \omega_i \rho_i \quad (8)$$

式中, HI 为均质系数, ω_i 为各参数的权重值, ρ_i 为各参数的相关性系数, n 为参数的个数。

由式 (8), 计算各研究区的均质系数见表 6。

表 6 研究区均质性评价

Table 6 Homogeneity evaluation for studied regions

| 平硐编号 | HI | 评价结果 |
|---------------|--------|------|
| PD241 和 PD253 | 0.8226 | 非常相关 |
| PD253 和 PD105 | 0.7864 | 高相关 |
| PD105 和 PD209 | 0.5662 | 高相关 |

结果表明, 虽然 PD105 和 PD209 在构造上有一些不同, 但并不影响最终将 4 个平硐划分为一个统计均质区, 因为它们的均质系数 (HI) 都大于 0.5。这个结论不同于以往单凭产状来划分岩体统计均质区, 因为统计均质区是受到多参数共同影响的。

4 结 论

(1) 本文提出了一种新的方法来划分岩体统计均质区, 即基于权的最小平方法的多参数统计均质区划分, 考虑了产状、间距、张开、迹长和粗糙度对统计均质区划分的影响并应用工程实例, 证明了该方法的可行性。

(2) 传统方法只考虑产状划分岩体统计均质区, 计算得出 PD105 和 PD209 不具有统计相似性, 但是综合考虑多参数的影响, 最终将 PD241, PD253, PD105 和 PD209 等 4 个平硐划分为一个统计均质区, 考虑了多参数的影响, 这样的结果更加合理。

(3) 新的方法可以运用到小样本裂隙的统计均质区划分, 因为相关系数法对样本大小没有严格要求^[6]。

(4) 文中仅考虑了产状、间距、张开、迹长和粗糙度对统计均质区的划分, 然而裂隙的充填程度、裂面风化程度、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。

参考文献:

- [1] 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. Computer simulation principle of 3D network numerical modeling technique[M]. Changchun: Northeast Normal University, 1995. (in Chinese))
- [2] MILLER R S M. A Statistical method to evaluate homogeneity of structural populations[J]. Journal of Mathematical Geology, 1983, **15**(2): 317 – 328.
- [3] 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, **48**(3): 217 – 229.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 范留明, 黄润秋, 丁秀美. 一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(7): 1132 – 136. (FAN Liu-ming, HUANG Run-qi, DING Xiu-mei. Analysis on structural homogeneity of rock mass based on discontinuity density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1132 – 1136. (in Chinese))
- [6] MARTIN M W, TANNANT D D. A technique for identifying structural domain boundaries at the EKATI Diamond Mine[J]. Engineering Geology, 2004, **74**(3/4): 247 – 264.
- [7] 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]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1440 – 1446. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuity and rock mass geometry[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 1979, **16**: 339 – 362.
- [10] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[J]. Journal of Applied Mechanics Reviews, 2002, **55**(2): B30.
- [11] ZHANG L, EINSTEIN H H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, **31**(4): 217 – 235.
- [12] COHEN J. Statistical power analysis for the behavioral sciences[M]. 2nd ed. New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1988.
- [13] CHU A T W, KALAB R E, SPINGARN K. A comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1979, **27**(4): 531 – 538.
- [14] 王志仁. 层次分析法中权的最小平方法[J]. 东北电力学院学报, 1995, **15**(2): 53 – 57. (WANG Zhi-ren. Least-square priority method of analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1995, **15**(2): 53 – 57. (in Chinese))
- [15] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications[M]. New York: Wiley, 1989.