

节理岩质边坡随机块体搜索的一种简便方法

杨超,徐光黎,赖方军,李志鹏

(中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074)

摘要:节理岩质边坡存在有大量由结构面和开挖坡面组合而成的随机块体。根据结构面和坡面的组合关系,将随机块体分为坡肩双面滑动、坡面双面滑动及坡面单面滑动3种类型,并运用“野外定性判断+赤平投影法”的方法综合确定边坡随机块体的类型。在详细的野外结构面采样的基础上,运用地质统计学与计算机技术随机生成三维结构面网络图。在前人关于生成结构面迹线图、搜寻封闭回路、搜索随机块体可能出现的最大区域、交点组合的基础上,提出通过对坡面迹线三角形进行随机块体类型匹配的方法,找出符合随机块体类型要求的迹线三角形,快速搜索出坡面随机块体。工程实例模拟结果亦证实了该方法的合理性,研究成果可为节理岩质边坡随机块体的形态描述、快速搜索提供一条新的思路与方法。

关键词:节理岩质边坡;随机块体类型;迹线三角形;匹配;块体搜索

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)09-0069-06

1 研究背景

岩体结构是指结构面与结构体的排列组合特征。对于节理岩质边坡而言,除了岩体本身强度外,岩体的结构特征往往是控制岩体变形破坏的决定性因素,而结构面则往往是变形和破坏的关键部位^[1]。所以,对岩质边坡进行稳定性评价时,边坡岩体结构面的研究是一项必不可少的工作。

近些年来,随着计算机技术的快速发展,运用结构面网络模拟进行岩体结构特征研究成为一大热点。通过结构面网络模拟,可以进行岩体质量评价、岩体渗透性分析以及开挖面随机块体稳定性评价等。在运用结构面网络模拟进行随机块体稳定性评价中,非常关键的一步是开挖面的随机块体的搜索。因此,国内外很多学者进行了该方面的研究。L. Jing 和 O. Stephansson^[2]在二维平面上通过寻找封闭回路进行了块体识别;Y. Ikegawa 和 J. A. Hudson^[3]定义了矢体、面矢、棱矢等概念;卢波,陈剑平等^[4]提出“有形即是有限”的分析方法,在三维空间内实现对有限块体的搜索;向晓辉、王俐^[5]根据随机凸多面体的截面积单调性特征,提出了基于三维裂隙网络模拟的有限块体面积判断法;张奇华、邬爱清^[6-7]建立了“有向性”原理和“封闭性”原理,通过三维结构面网络模拟、封

闭块体搜索等过程,形成全空间块体拓扑搜索的一般方法,并在此基础上,对4种块体类型的搜索进行分析,实现了边坡/洞室岩体的全空间块体拓扑搜索技术;王述红等^[8-9]通过对工程岩体划分网格,形成小的块体单元,然后依次添加确定性结构面和非确定性结构面,对单元块体进行切割,最后去除网格合并小块体完成对复杂的块体的搜索;钟登华,鲁文妍等^[10]在建立岩体结构三维精细模型的基础上,提出曲面块体的概念和数学定义,综合考虑随机裂隙面和空间断层、洞室开挖面等确定性地质结构面来进行曲面块体识别与分析。

由以上取得的成果可见,随机块体的搜索经历了从二维到三维,从简单形态到复杂形态,从仅考虑随机结构面的组合到综合考虑随机结构面和确定性结构面组合的研究过程,不断向着复杂化、精细化的方向发展。而随着搜索技术的复杂化、精细化,算法的复杂度也不断增加,对计算机编程能力也提出了更高的要求,且难以满足工程快捷、实用的现实需求。本文在详细分析边坡开挖面随机块体几何构成的基础上,提出一种简便的搜索方法,即直接在开挖面搜索随机四面体的方法来完成岩质边坡三维随机块体搜索,在保证一定精度的情况下,简化其搜寻过程。本研究可为节理岩质边坡随机块体的快速搜索提供一条新的思路与方法。

2 节理岩质边坡随机块体类型及其确定方法

节理岩质边坡开挖过程中,由于结构面交叉组合,坡面常形成不稳定的随机块体。这些随机块体存在,往往是造成边坡局部失稳的重要原因之一。

工程实践表明,3组结构面加临空面形成的四面体,是边坡随机块体的最常见形式,在研究上也较为简单。而3组以上结构面加临空面形成的块体,在工程实际中则较为少见,再者,其常与四面体在空间位置上重叠或部分重叠^[11]。因此,分析随机四面体具有重要的工程意义和现实需求。考虑以上原因,本文主要针对随机四面体的搜索予以研究。

2.1 随机块体类型

根据边坡开挖面随机四面体的几何构成,将其分为坡肩双面滑动、坡面双面滑动、坡面单面滑动3种类型。

2.1.1 坡肩双面滑动型

图1(a)所示的四面体 $ABCD$ 为坡肩双面滑动型四面体。它是相交的两组结构面 ABC 和 ADC 同时出露于坡肩而形成的倒三棱锥体,将沿着滑面 ABC 和 ADC 发生双面滑动。图1(b)为一般情况下该类型的四面体对应的赤平投影图(假定坡向为正南方向,坡角 75°)。

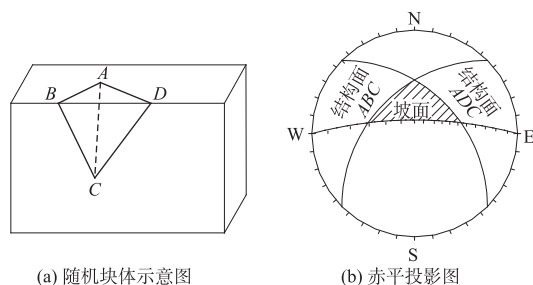


图1 坡肩双面滑动型随机块体
Fig.1 Random block sliding through double discontinuities in the slope shoulder

2.1.2 坡面双面滑动型

图2(a)所示的四面体 $ABCD$ 为坡面双面滑动型四面体。它是由结构面 BCD 与结构面 ABC 和 ADC 以及坡面共同组合而成。它基本上沿着滑面 ABC 和 ADC 发生双面滑动,结构面 BCD 通常起切割分离的作用。图2(b)为一般情况下该类型的四面体对应的赤平投影图(假定坡向为正南方向,坡角 75°)。

2.1.3 坡面单面滑动型

图3(a)所示的四面体 $ABCD$ 为坡面单面滑动型四面体。它是由倾向临空方向的结构面 ABD 以

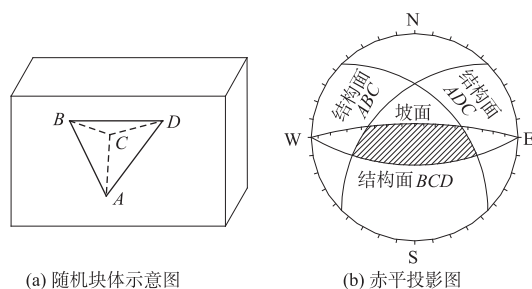


图2 坡面双面滑动型随机块体
Fig.2 Random block sliding through double discontinuities in the slope surface

及结构面 ABC 和 ADC 、坡面共同组合而成。它基本上是沿着结构面 ABD 发生单面滑动,结构面 ABC 和 ACD 通常起切割分离的作用。图3(b)是一般情况下该类型的四面体对应的赤平投影图(假定坡向为正南方向,坡角 75°)。

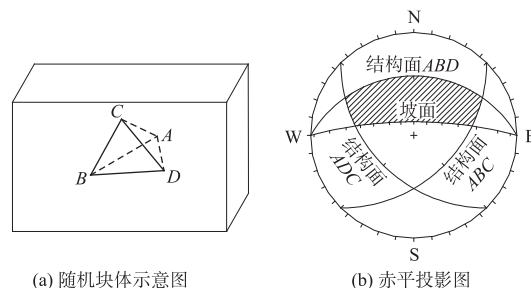


图3 坡面单面滑动型随机块体
Fig.3 Random block sliding through single discontinuity in the slope surface

2.2 随机块体类型的确定方法

在完成随机块体的分类后,根据边坡的结构面实际组合情况,就可以确定该边坡的随机块体类型。本文采用“野外定性判断+赤平投影法”的方法综合确定边坡随机块体类型,该方法的过程如下:

(1) 在进行野外结构面采样时,根据现场实际出露的随机块体情况,对开挖面可能出露的随机块体类型进行定性判断。

(2) 在完成结构面分组的基础上,选取每组结构面的平均倾向和平均倾角以及坡向、坡角,做结构面赤平投影图。对结果进行分析,并对照各类型随机块体的赤平投影图,确定边坡随机块体的类型。

(3) 将“赤平投影法”确定的随机块体类型和“野外定性判断”确定的随机块体类型进行对比,如果结果一致,则完成随机块体类型确定。如果不一致,则进行野外符合或者结构面分组校核,直到两者得到的结果一致为止。

3 三维随机块体搜索过程

本文通过结构面网络三维模拟方法,生成结构

面三维网络图后,就可以在坡面进行三维随机块体的搜索。结构面网络三维模拟是根据结构面发育具有随机性的特征,依据统计学原理,采用 Monte-Carlo 随机模拟方法在计算机上进行模拟^[12-13]。由于篇幅有限,对该方法的原理及过程就不过多介绍。三维随机块体搜索的流程见图4,具体过程如下。

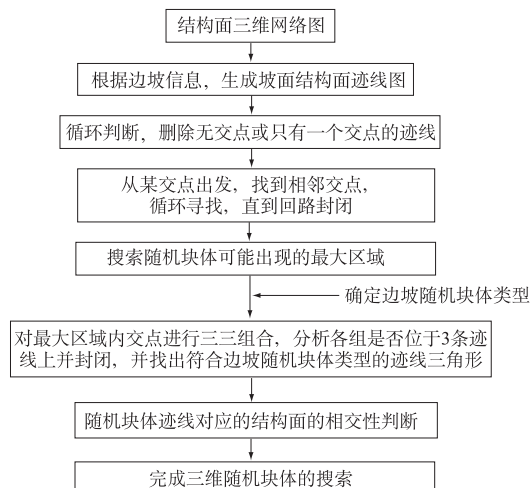


图4 边坡随机块体搜索的流程图

Fig.4 The process of identifying random blocks in the slope

3.1 生成结构面迹线图

通过 Monte-Carlo 随机模拟方法生成岩体三维结构面网络图之后,再与边坡开挖面进行相交判断,分析结构面与开挖面相交的交点信息,分析交点类型。若结构面与开挖面能相交,则在该开挖面上形成对应的结构面迹线。

3.2 寻找封闭回路

在开挖面上,首先删除无交点或只有一个交点的迹线,直至迹线互相存在“搭接”^[14]。然后从某交点(基点)出发,找到相邻交点,并以相邻交点为基点,根据基点相邻交点的方向角排序,找到下一相邻交点,循环寻找直到回路封闭。

3.3 确定随机块体可能出现的最大区域

在封闭回路的基础上,确定随机块体可能出现的最大区域。确定的原则是以外回路的边界作为分析对象,沿着顺时针方向的外回路前进,当相邻两交点的“线段方向”与“迹线方向”一致时,删除该线段,并将该线段相应的内回路的其它边设为外回路的边;需对所有的外回路进行循环判断,若存在线段删除,则重新进行循环判断。

3.4 迹线三角形类型匹配

在随机块体可能出现的最大区域内,对所有交点进行三三组合,分析各组合是否位于3条迹线上并封闭,即获得封闭的迹线三角形。

通过第2节的分析可知,不同的随机块体类型,对应的迹线三角形的形态是明显不同的。具体分为以下3种情况:

(1) 当边坡随机块体为坡肩双面滑动型时,坡顶和另外两组结构面在坡面组合形成图5(a)所示的迹线三角形。

(2) 当边坡随机块体为坡面双面滑动型时,坡面三组结构面将组合形成图5(b)所示形态的迹线三角形。

(3) 当边坡随机块体为坡面单面滑动型时,坡面的三组结构面将组合形成图5(c)所示形态的迹线三角形。

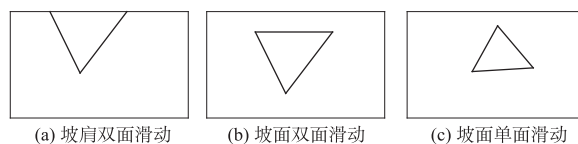


图5 3种不同类型块体在坡面所对应的迹线三角形

Fig.5 Trace line triangles of blocks with 3 different types

因此,当搜索出所有迹线三角形后,根据边坡随机块体的类型,对照其在开挖面出露的迹线三角形形态特征,筛选出与随机块体类型匹配的迹线三角形。

3.5 随机块体三维搜索

考虑到此时搜索到的块体的3条迹线对应的结构面在坡体内还可能不存在不相交的情况。为此,还要对其进行相交性判断。这个只要求出3个结构面在三维空间内存在共同的交点即可,如果交点存在的则保留迹线,交点不存在的则删除迹线。这样就搜索出满足要求的三维随机块体。

4 工程实例

某拟建水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县境内,地处大渡河上游。水电站的修建将形成数百米的高边坡,为了更有效、直观地反映该水电站厂房后边坡结构面发育和切割组合情况,弄清厂房后边坡岩体结构特征,在野外现场结构面详细调查统计的基础上,对地面厂房后边坡V级结构面进行了网络模拟。

我们选取了露头条件较好的平硐 PD07 硐口附近进行结构面的采样。主要采用统计窗方法进行采样,图6为现场结构面统计窗素描图。根据结构面采样结果,运用结构面等密度图,对结构面进行分组,并参照现场判断的分组情况,将该边坡结构面划分为3组。各组结构面的几何特征参数值见表1。

表 1 各组结构面的几何特征参数值

Table 1 Geometry characteristic parameters of different sets of discontinuities

组号	倾向			倾角			迹长			间距		
	分布形式	均值/(°)	标准差/(°)	分布形式	均值/(°)	标准差/(°)	分布形式	均值/m	标准差/m	分布形式	均值/m	方差/m ²
1	正态	205.11	5.4	正态	68.96	0.85	正态	4.8	0.21	负指数	0.55	0.15
2	正态	327.56	3.34	正态	64.22	5.12	正态	0.8	0.14	负指数	0.43	0.12
3	正态	78.22	8.06	正态	38.76	5.2	正态	1.6	0.29	负指数	0.43	0.08

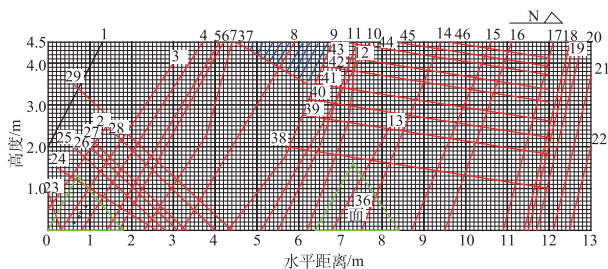


图 6 厂房后边坡结构面统计窗素描图

Fig. 6 Sketch of statistical window of the discontinuities in the back slope of the powerhouse

通过现场定性判断,该边坡主要出露有 3 组结构面:1 组顺坡向的缓倾角结构面外加 2 组反向陡倾角的结构面。将组合形成坡面单面滑移型的随机块体,如图 7 所示。

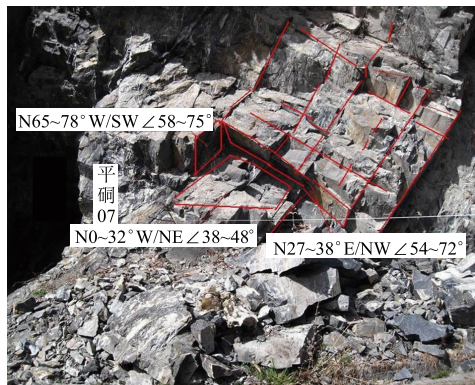


图 7 厂房后边坡出露的随机块体

Fig. 7 Random blocks exposed at the back slope of the powerhouse

根据各组结构面的参数以及坡面信息,画出结构面赤平投影图(图 8),对照各类型随机块体的赤平投影图,可知该边坡的随机块体类型为坡面单面滑移型。

通过以上综合判断,可以确定该边坡的随机块体类型为坡面单面滑移型,其对应的坡面的迹线三角形形态如图 9 所示。因此,最终搜索出来的块体对应的迹线三角形应与图 9 一致。

运用 Monte-Carlo 随机模拟方法,根据表 1 所列出的各组结构面的几何特征统计参数,通过自行开发的结构面网络模拟软件,生成结构面三维网络图(图 10),经过一系列的搜索过程,完成边坡随机块体的搜索,搜索过程见图 11。

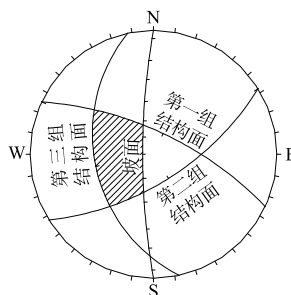


图 8 厂房后边坡结构面对应的赤平投影图

Fig. 8 Stereographic projection of the discontinuities in the back slope of the powerhouse

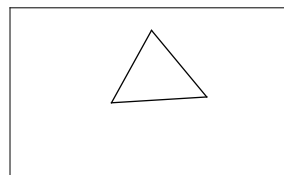


图 9 厂房后边坡随机块体对应的迹线三角形

Fig. 9 Trace line triangle of the blocks in the back slope of the powerhouse

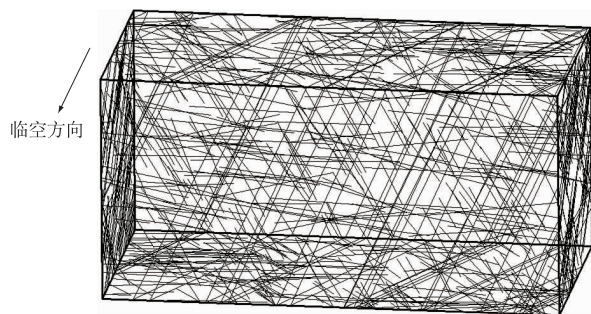
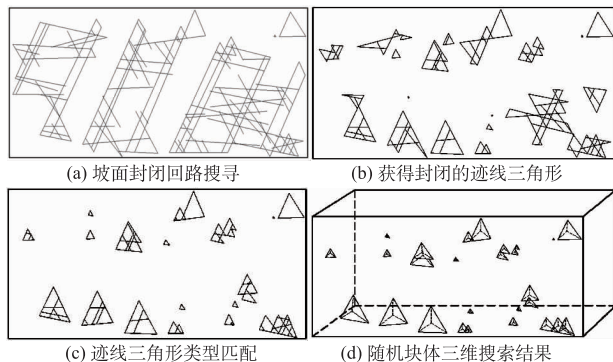
图 10 厂房后边坡结构面网络三维模拟图
(尺寸:5 m×10 m×5 m)Fig. 10 Three-dimensional network simulation of the discontinuities in the back slope of the powerhouse
(5 m×10 m×5 m)

图 11 坡面随机块体搜索过程

Fig. 11 Process of identifying the random blocks in the slope surface

对以上随机块体搜寻的结果进行分析,得到坡面随机块体覆盖率为13.24%。随机块体体积分布情况见图12。

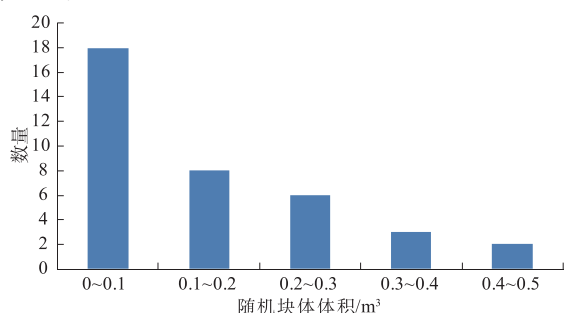


图12 随机块体体积分布图

Fig. 12 Volume distribution of the random blocks

由图12可知,随机块体的体积分布基本上呈负指数分布,体积越小,随机块体数量越多。但是就总体积而言,大块体($\geq 0.3 \text{ m}^3$)的体积总和远远比小块体($< 0.2 \text{ m}^3$)的体积总和要大得多。

而根据现场的随机块体统计分析,该区域随机块体覆盖率约为10%,体积大小也主要在 $0.1 \sim 0.6 \text{ m}^3$ 之间,且体积由小到大的数量也基本满足负指数分布。表明运用该方法搜索的随机块体结果与现场情况基本一致,在实际工程的应用中能取得较为合理的结果。

5 结 论

节理岩质边坡随机块体的搜寻是一件较为复杂的工作,本文首先对边坡随机块体予以分类,而后,基于现场边坡结构面发育与坡面切割组合分析,确定随机块体类型,进而进行随机块体的搜寻与迹线三角形匹配,可实现对边坡随机块体的快速搜索确定。综合本文的研究工作,可得到以下主要结论:

(1) 根据坡面、结构面的组合关系,重点分析随机四面体,将边坡随机块体分为坡肩双面滑动、坡面双面滑动、坡面单面滑动3种类型。

(2) 运用“野外定性判断+赤平投影法”综合分析的方法确定边坡随机块体的类型。

(3) 在以上分析的基础上,提出一种较为简便的边坡随机块体搜寻的方法:首先在详细的结构面野外采样和统计分析的基础上,确定边坡随机块体类型,并运用 Monte-Carlo 随机模拟方法进行边坡岩体结构面网络三维模拟,生成结构面迹线图。然后通过搜寻封闭回路,搜索随机块体可能出现的最大区域、最大区域内交点组合、随机块体迹线三角形类型匹配、三维块体等过程搜索真正的三维随机块体。

(4) 工程实例分析表明,本文方法所搜寻的随机块体结果与工程实际基本一致,在实际工程应用中能取得较为合理的结果。可以通过对随机块体的块体覆盖率、体积大小、体积分布形式等研究,为工程支护分析提供依据。

参考文献:

- [1] 徐光黎,潘别桐,唐辉明,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, PAN Bie-tong, TANG Hui-ming, et al. Rockmass Structural Model and Its Application[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993. (in Chinese))
- [2] JING L, STEPHANSSON O. Topological Identification of Block Assemblages for Jointed Rock Masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(2): 163 - 172.
- [3] IKEGAWA Y, HUDSON J A. Novel Automatic Identification System for Three-Dimensional Multi-block Systems[J]. Engineering Computations, 1992, 9(2): 169 - 179.
- [4] 卢波,陈剑平,王良奎,等. 基于三维网络模拟基础的复杂有限块体的自动搜索及其空间几何形态的判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1232 - 1238. (LU Bo, CHEN Jian-ping, WANG Liang-kui, et al. Automatic Seeking for Complex Finite Rock Block and Judgment of Its Spatial Geometrical Shape Based on 3D Network Modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1232 - 1238. (in Chinese))
- [5] 向晓辉,王俐,葛修润,等. 基于三维裂隙网络模拟的有限块体面积判断法[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1633 - 1636. (XIANG Xiao-hui, WANG Li, GE Xiu-run, et al. Area-judgment Method for Complex Finite Rock Blocks Based on Three-dimensional Network Simulation of Fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1633 - 1636. (in Chinese))
- [6] 张奇华,邬爱清. 随机结构面切割下的全空间块体拓扑搜索一般方法[J]. 岩石力学与工程报, 2007, 26(10): 2043 - 2048. (ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. General Methodology of Spatial Block Topological Identification With Stochastic Discontinuities Cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2043 - 2048. (in Chinese))
- [7] 张奇华,邬爱清. 边坡及洞室岩体的全空间块体拓扑搜索研究[J]. 岩石力学与工程报, 2008, 27(10): 2072 - 2078. (ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Study on Spatial Block Topological Identification of Slope and Cavern Rock Mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2072 - 2078. (in Chinese))

- nese))
- [8] 王述红,张靖杰,李云龙,等. 工程岩体开挖过程全空间块体搜索其系统研制[J]. 东北大学学报(自然科学版),2010,31(7):1026-1029. (WANG Shu-hong, ZHANG Jing-jie, LI Yun-long, *et al.* Quickly Spatial Identification Process of Blocks During Rock Excavation and Its System Modeling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010,31(7):1026-1029. (in Chinese))
- [9] 王述红,杨 勇,王 洋,等. 裂隙岩体隧道施工关键块体识别数值方法[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(5):976-979. (WANG Shu-hong, YANG Yong, WANG Yang, *et al.* Numerical Method of Key Block Identification for Jointed Rock Tunnel Construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5):976-979. (in Chinese))
- [10] 钟登华,鲁文妍,刘 杰,等. 基于三维地质模型的地下洞室曲面块体分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增2):3696-3702. (ZHONG Deng-hua, LU Wen-yan, LIU Jie, *et al.* Surface-Block Analysis of Underground Cavern Based on 3D Geological Modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup. 2): 3696-3702. (in Chinese))
- [11] 邬爱清,张奇华. 岩石块体理论中三维随机块体几何搜索[J]. 水利学报,2005,36(4):1-9. (WU Ai-qing, ZHANG Qi-huang. Geometric Identification of Stochastic Block in Block Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4):1-9. (in Chinese))
- [12] 贾洪彪,唐辉明,刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展[J]. 地质科技情报,2001,20(1):105-108. (JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Advances in the Study of Rock Discontinuities Network Modeling Technique[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1):105-108. (in Chinese))
- [13] 贾洪彪,马淑芝,唐辉明,等. 岩体结构面网络三维模拟的工程应用研究[M]. 北京:科学出版社,2008. (JIA Hong-biao, MA Shu-zhi, TANG Hui-ming, *et al.* Theory and Engineering Application of 3-D Network Modeling of Discontinuities in Rockmass[M]. Beijing: Science Press,2008. (in Chinese))
- [14] SHI G H, GOODMAN R E. The Key Blocks of Unrolled Joint Traces in Developed Maps of Tunnel Walls[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1989, (13):131-132.

(编辑:周晓雁)

A Simple Method to Identify Random Blocks in Jointed Rock Slopes

YANG Chao, XU Guang-li, LAI Fang-jun, LI Zhi-peng

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A large number of random blocks mainly formed by the combination of discontinuities and slope surface can be found in the jointed rock slopes. According to the combination between discontinuities and slope surface, the random blocks are divided into three types: block sliding through double sides on slope shoulder, block sliding through double sides on slope surface and block sliding through single side on slope surface. The method of "field qualitative judgment plus stereographic projection" is used to identify the type of random blocks. On the basis of detailed field sampling of discontinuity, three-dimensional discontinuity network simulation is performed by using geological statistics and computer technology. On the basis of former researches on obtaining the diagram of discontinuity trace lines, identifying the largest region where random blocks appear and the combination of points, a method of matching the trace line triangles with the type of the random blocks to identify the random blocks is put forward. The method is proved to be reasonable by engineering practice. The research provides a new approach to describe and rapidly identify the random blocks of jointed rock slope.

Key words: jointed rock slope; random block type; trace line triangle; match; block identification