

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.032

基于块体理论的岩质高边坡稳定性研究

罗光财¹, 齐 龙², 王 震¹, 王述红²

(1. 中建五局土木工程有限公司, 湖南 益阳 413000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 岩质高边坡稳定性分析对于下穿公路及建筑的安全起着至关重要的影响。通过运用关键块体理论, 结合先进的非接触测量技术与 GeoSMA-3D 系统, 对益阳东部新区外环路建设项目 K3+300—K3+340 坡段高边坡稳定性进行了比对分析。通过比对不同边坡坡角下, 整体稳定性系数的变化与关键块体的体积发现: 在一定范围内, 边坡的整体稳定安全系数随着坡脚的变大而变小; 搜索到的关键块体数量随着边坡坡脚的变大而减少, 当坡脚小于 60° 时, 边坡整体较安全; 当坡脚大于 60° 时应该适当考虑后期分级支护及边坡的削坡问题。

关键词: 高陡边坡; 块体识别; 结构面; 边坡稳定性

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0178-05

Stability Analysis of High and Steep Slope Based on Block Theory

LUO Guangcai¹, QI Long², WANG Zhen¹, WANG Shuhong²

(CCFEB Civil Engineering Co., Ltd., Yiyang, Hu'nan 413000, China;

2. Northeastern University School of Resources and Civil Engineering, Shengyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: The stability analysis of high rock slope plays an important role in the safety of highway and building. Based on the key block theory this paper combined with the advanced non-contact measurement technology and GeoSMA-3D system of Yiyang eastern new construction of the outer ring road of K3+300—K3+340, and compared and analyzed the slope stability of high slope by comparing different slope angle, the overall stability coefficient and the change of key block size found. In a certain range, with the overall stability safety factor of the slope decreases, the number of key block search to decrease as the slope becomes larger, when the slope is less than 60°, the overall slope is safe, when the slope is greater than 60° should be appropriate to consider the late support in grade and slope cutting slope problems.

Keywords: high and steep slope; block identification; structural plane; slope stability

随着边坡工程建设规模不断地扩大, 尤其是高陡边坡的比例日趋上升, 提高高边坡岩体稳定性的研究水平, 具有重要的科学和社会意义。含有大量岩体的地层中, 岩体被结构面切割成各种类型的结构体, 这些结构体的存在会导致整个岩坡的失稳。近年来岩质高边坡的研究越来越引起人们的关注。主要包括动力特性^[1-2]、参数特性^[3-4]、空间表征等方面^[5], 上述研究目前大致分为两个主要方向: 力学计算分析法与综合评价法。力学分析法主要是通过运用包括有限元、离散元、流形元等不同的力学分析理论, 对高陡岩坡在震动、渗流等各种环境条件下的

应力位移场, 进行比对分析^[6-7]; 综合评价法是指运用模糊模型、灰度模型、遗传模型、神经网络模型等统计管理学模型, 在考虑力学效应的同时, 更加客观全面的对整体岩坡进行综合整体的评价^[8-9]。

在对高陡岩坡的研究中, 常将岩质岩体看成连续体, 通过设置岩石的力学参数来模拟岩质边坡。但这种方法忽略了岩体非连续性及大变形这些重要的力学性质。因此运用块体理论^[10-11]研究上述块体化岩体模型破坏机制最有效方法之一, 因为其核心内容是通过分析开挖面周围块体稳定性来搜索关键块体, 进而分析岩体工程开挖面的稳定性。块体

收稿日期: 2017-05-02

修稿日期: 2017-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050; U1602232); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLP2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006)

作者简介: 罗光财(1979—), 男, 湖南常德人, 工程师, 硕士, 主要从事施工技术研究工作。E-mail: 350460420@qq.com

理论作为一种比较新颖的岩体分析方法,它由著名美籍华人科学家 Shi 于 1985 年首次提出,目前已经广泛的应用于包括三峡大坝在内的多种工程中^[10-12],同时诸多学者也分别在块体切割搜索^[13]、曲面块体表现^[14]、块体合并^[15]、块体稳定性计算方法^[16]等诸多方面进行了研究并取得了丰厚的成果。但对于块体理论的研究多围绕大体积单一块体进行,对于结构面较密集的碎裂岩体而言具有一定局限性。本文将块体理论应用于益阳东部新区外环路建设项目 K3+300—K3+340 坡段,针对结构面密集且风化严重这一特点,提出了基于块体体积的整体稳定性系数,对该碎裂岩质边坡的稳定性进行了定量评价。从而可以预测出在不同放坡时边坡的稳定性情况,为边坡工程的安全开挖及后期支护提供有力的理论依据。

1 块体理论方法及实现

关键块体理论假设岩体被各种结构面及临空面进行切割后会形成各种形状的块体,这些块体表面上看起来杂乱无章,实际有严格的分类。在岩体受结构面切割后首先可以分为有限性块体和无限块体。通过块体有限性定律可进行判断,即某凸块体平移各半空间界面使之通过的坐标原点形成棱锥,若棱锥为空集则块体为有限,若不为空集,则块体为无限。得到有限块体之后,通过块体的可动性对块体进行判断,即当结构面和临空面构成的块体有限时,仅结构面构成的块体无限时,块体为可动;反之块体为不可动。可动性分析之后,对块体进行运动学分析,可以将可动块体分为稳定块体、可能失稳块体及应该重点维护加固的关键块体。

边坡的稳定性是由各关键块体的稳定性控制,而关键块体的稳定性系数判断可得以下两种形式:

(1) 单面接触滑动。单面滑动时的安全系数为

$$F_s = \frac{N_i \cdot f_i + c_i \cdot A_i}{T_i} \quad (1)$$

其中, f_i 为滑动面 i 的摩擦系数,即 $f_i = \tan \varphi_i$; c_i 为滑动面 i 的黏聚力; A_i 为滑动面 i 的面积; N_i 为主动力合力 $\vec{r}$ 在滑动面 i 上沿法线方向的分量,即 $N_i = |\vec{n} \cdot \vec{r}|$; T_i 为主动力合力 $\vec{r}$ 在滑动面 i 上沿切向方向的分量,即 $T_i = |\vec{n} \times \vec{r}|$ 。

(2) 双面接触滑动。双面滑动时的安全系数为

$$F_s = \frac{N_i \cdot f_i + c_i \cdot A_i + N_j \cdot f_j + c_j \cdot A_j}{T_{ij}} \quad (2)$$

其中, f_i 、 f_j 分别为滑动面 i 和 j 上的摩擦系数; c_i 、 c_j

分别为滑动面 i 和 j 上的黏聚力; A_i 、 A_j 分别为滑动面 i 和 j 上的面积; N_i 、 N_j 分别为主动力合力 $\vec{r}$ 在滑动面 i 和 j 上沿法线方向的分量; T_{ij} 为主动力合力 $\vec{r}$ 在滑动面 i 和 j 上沿切线方向的分量。其中 N_i 、 N_j 和 T_{ij} 按照下面各式计算:

$$N_i = \frac{|(\vec{r} \times \vec{n}_i) \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n})|}{|\vec{n}_i \times \vec{n}_j|^2} \quad (3)$$

$$N_j = \frac{|(\vec{r} \times \vec{n}_j) \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n})|}{|\vec{n}_i \times \vec{n}_j|^2} \quad (4)$$

$$T_{ij} = \frac{|\vec{r} \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n}_j)|}{|\vec{n}_i \times \vec{n}_j|} \quad (5)$$

GeoSMA - 3D 系统 (Geotechnical Structure and Model Analysis) 是“岩土工程结构与模型分析系统”的简称^[17-19]。GeoSMA - 3D 是东北大学基于关键块体理论独立开发出的一款判断岩体稳定性的系统。本系统考虑了岩体的真实特征:非连续性、非均质性、各向异性、非弹性,以及工程扰动因素如爆破施工等。建立三维数值模型,在可视化环境中实现工程岩体任意剖切、量算、块体显示和开挖设计,经过程序自动计算和搜索,自动找出可动块体并提取真正的关键块体,实现各类数据统计、查询与空间分析,对于岩体工程设计和施工实践具有很重要的实际意义(见图 1)。

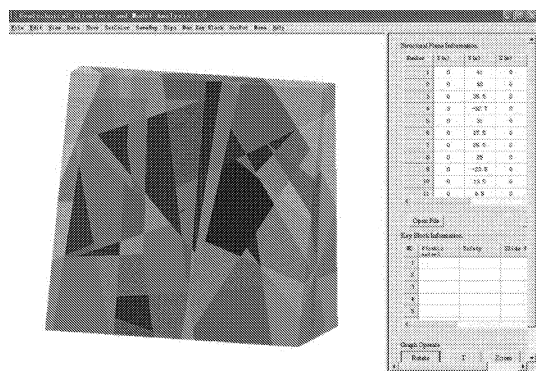


图 1 GeoSMA - 3D 块体搜索系统

2 工程实例

2.1 工程概况

本文选取益阳东部新区外环路建设项目 K3+300—K3+340 坡段高陡边坡为研究对象(见图 2)。K3+300—K3+340 坡段边坡路面为右侧开挖路堑。根据现场踏勘和钻探资料显示,该处设计高程 95 m,中心挖高约 4.7 m,右侧最深挖高 83 m,为 5 级边

坡坡段,考虑放缓边坡坡率的情况下,边坡挖高将一直往高山处开挖,并辅以锚杆进行坡面加固,坡脚采用护脚的形式,边坡防护形式为三维网或者拱形骨架防护形式,坡顶外侧 5 m 设置截水沟,并进行植草绿化,其中第二平台宽度为 4 m,其他的边坡平台为 2 m,进行分级设置。根据详勘资料,该挖方段均为风化板岩,其性状:灰黄色,灰色,浅紫红色,变余结构,薄层夹中厚层板状构造,岩质稍硬,为较软岩,岩体较完整。上覆表土层易被水流冲刷,沿岩面易发生坍塌,应采用缓坡并进行坡面防护。下伏基岩为板岩,岩体较完整,结构面结合一般,岩层产状为 $255^{\circ}\angle 50^{\circ}-80^{\circ}$,与路线走向交角近 40° ,为顺坡向,易产生顺层滑塌,且劈理(节理)发育,节理产状参考路中右侧边坡节理发育,形成不稳定的块体,产生局部的坍塌或掉块,对边坡稳定性不利,因此应该对该坡段的关键块体情况进行评价。为了更好对高陡边坡进行分析,本研究首先将边坡分为 5 级,并分别在 45° 、 60° 、 70° 、 80° 等 4 种不同坡脚情况下进行对比分析各级稳定性和关键块体情况(见图 3)。

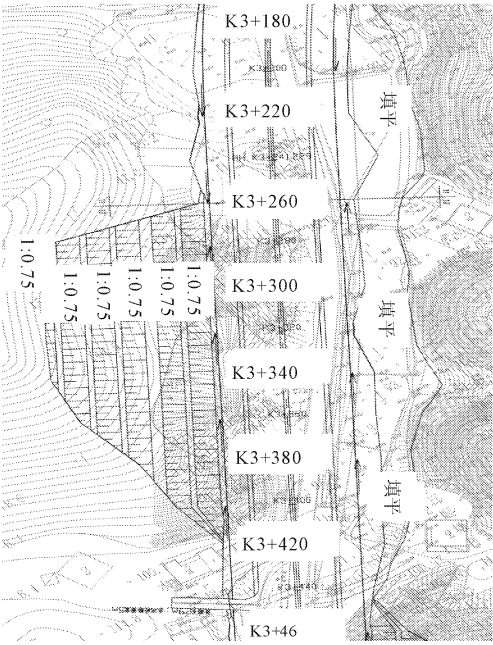


图 2 K3 + 300—K3 + 340 坡段高边坡平面设计图

2.2 非接触结构面测量

为了获得岩体几何参数和结构面参数,运用了三维非接触测量系统—ShapeMetriX3D^[10],该系统可以通过高清摄影图片对岩体及其表面形状的进行三维建模,并且可以通过相应的分析,得到岩体表面结构面的相关信息,岩体结构面的倾向、倾角、中心点坐标等。另外该系统还可以对边坡进行空间建模,最终得到坡高、坡角等相应的边坡几何参数。

经过 ShapeMetriX3D 结构面搜索,建立起边坡三维模型(见图 4),经过对岩体表面确定性结构面的搜索,共搜索到确定性结构面信息 41 条,用赤平投影图进行表征(见图 5),根据其特性对其进行组别划分,共分为 3 组。

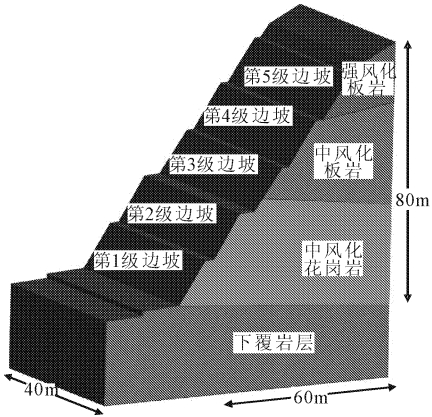


图 3 K3 + 300—K3 + 340 坡段高陡边坡分级

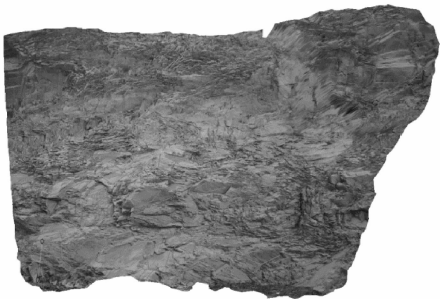


图 4 边坡第 1 级非接触测量空间建模

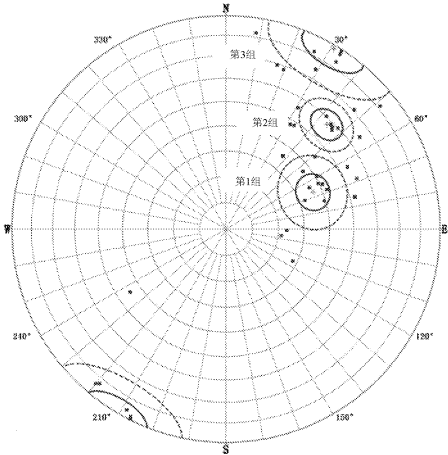


图 5 K3 + 340 坡段结构面分组赤平投影图

在实际关键块体搜索中,在岩体中存在着许多表面无法观察到的结构面,这些结构面同时也对岩体的整体稳定性有影响。因此除了应该考虑通过 ShapeMetriX3D 摄像技术获得的确定性结构面以外,还应该考虑通过结构面参数的随机分布规律,对确定性结构面进行随机性模拟^[17]。本文中根据结构

面分布特性,主要考虑用 Fisher 分布与双正态分布的形式分别对倾向、倾角进行随机结构面的模拟。将确定性结构面与随机生成结构面同时加入到 GeoSMA – 3D 系统中进行全部可移动块体的搜索。

2.3 块体搜索及稳定性分析

将得到的结构面数据引入 GeoSMA – 3D 系统

表 1 不同岩体力学参数

岩层名称	弹性模量 E/MPa	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c /kPa	张拉强度 /MPa
中风化板岩	20.50	0.42	24.83	10.90	30.53	26.20
强风化板岩	13.40	0.39	14.25	8.30	15.26	17.40
风化花岗岩	76.20	0.20	47.28	30.20	55.00	89.90

表 2 不同结构面力学参数

节理裂隙	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	张拉强度 σ_t/MPa
节理裂隙面	13.25	12.43	0.020
压破碎带	10.67	9.56	0.010
层面	15.67	11.45	0.025

表 3 确定性结构面产状计算参数

组别	走向 / $(\text{^\circ})$	倾向 / $(\text{^\circ})$	组内 个数	置信度 /%
第 1 组	247.00	36.42	15	94.416
第 2 组	223.86	57.47	11	96.965
第 3 组	210.79	88.04	15	89.329

中,同时输入表 1、表 2 中的结构面与岩体的相应力学参数与表 3 中结构面产状参数,就可以得到如图 6 所示可移动块体。其中块体为系统搜索出的符合块体可动性的块体。细线为结构面切割岩体形成的迹线。

是以单个块体计算的,不同的块体的安全系数也不同,为了给出一种综合的评价方法,并且可以更好的对边坡的整体安全系数进行评价。于是本文采用按块体体积加权的方法得出边坡总体安全系数 $F_{\text{总}}$ 。

$$F_{\text{s总}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{Bn}} \cdot F_{\text{sn}})}{\sum_{i=1}^n V_{\text{Bn}}}$$

(6)

其中, V_{Bn} 代表搜索出的第 n 个块体的体积; F_{sn} 代表搜索出的第 n 个块体的安全系数。

图 7 表现了各级边坡整体稳定性系数与坡脚变化之间的关系。可以观察到五级边坡的总体稳定性系数均随着坡脚的增大而减小。当坡脚接近 60° 时,即坡度达到 1:0.57 时,各个边坡的整体稳定性系数接近于 1,达到临界状态,有发生危险的可能。应该进行相应的支护与锚固措施。当坡脚大于 60° 时,整体稳定性系数过小,危险程度较大,应该适当的进行削坡已保证整体稳定的安全。同时可以看出,再临界角度 60° 时,第三级与第四级边坡明显整体稳定性系数低于 1.05,因此在实际工程中应该适当考虑加大放坡的力度。

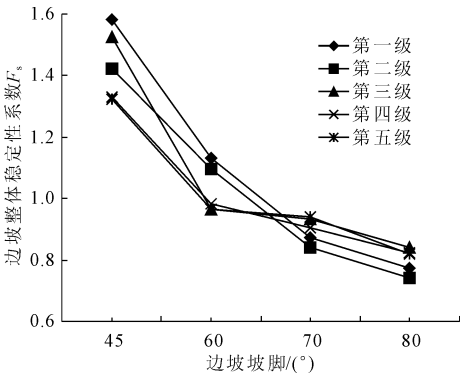


图 7 各级边坡整体稳定性系数随坡脚变化曲线

当安全系数 F_s 小于 1.05 时,可移动块体会转

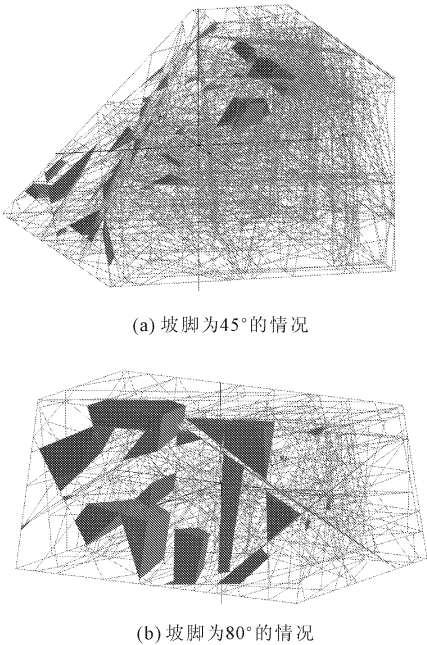


图 6 坡段第 1 级边坡可移动块体轴侧图

为了更好的分析边坡的坡脚变化对整个边坡稳定性的影响,文章采用了整体边坡稳定性系数的方法进行判断(如式(6))。由于传统的块体安全系数

变为关键块体。关键块体的存在对整个边坡的稳定性产生相当大影响,由于块体已经处于不稳定的状态,极有可能因为降雨或扰动情况发生突发性崩塌,甚至会引发岩体剥落及滑坡等地质灾害。因此,对各个区段的关键块体体积的变化规律的研究十分重要。图 8 中显示的为在各级边坡坡脚变化过程中,生成关键块体的体积。可以看出,搜索到的关键块体的体积基本与坡脚大小成负相关,即随着坡脚的增大生成关键块体的体积也会增大。而且第 1 级与第 2 级边坡中关键块体的体积明显多于第 3、4、5 级边坡,这可能是由于岩体内部的自重应力对岩体结构面的黏结强度有一定的影响,也与不同层级边坡所处的岩层不同有关。

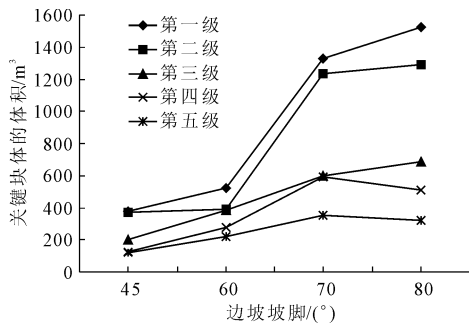


图 8 各级边坡生成关键块体体积随坡脚变化曲线

3 结 论

本文通过运用关键块体理论,结合 GeoSMA-3D 系统,对益阳东部新区外环路建设项目 K3+300—K3+340 坡段高边坡稳定性进行了比对分析,通过比对不同边坡坡角下,整体稳定性系数的变化与关键块体的体积的分析发现,在一定范围内,边坡的整体稳定安全系数随着坡脚的变大而变小,且当坡脚小于 60°时,边坡整体较安全,当坡脚大于 60°时 3、4、5 级边坡稳定性较差。同时,搜索到的关键块体数量随着边坡坡脚的变大大致呈减少趋势,第 1、2 级岩坡搜索到的关键块体体积明显大于 3、4、5 级边坡,应该适当考虑后期应该采取分级支护及分级削坡的方法保证在稳定的前提下最大程度的增加经济效益。

参考文献:

- [1] 杜朋召,刘建,韩志强,等.基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(S1):393-398.
- [2] 夏栋舟,刘建华,何忠明.强震作用下岩质高边坡动力特性[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(6):2396-2402.
- [3] 杨帆,侯克鹏,谢永利.岩质高边坡岩体力学参数确定及稳定性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(6):845-853.

- [4] 徐卫亚,孟永东,田斌,等.复杂岩质高边坡三维地质建模及虚拟现实可视化[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2385-2397.
- [5] 李大茂,张国辉,袁从华.基于数值仿真的全强风化岩质边坡失稳机制研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):205-209.
- [6] 梅林,王述红,佟可惠,等.不同交界面对二元结构边坡破坏影响试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):6-11.
- [7] 薛新华,刘忠正.基于改进爬山聚类法的模糊神经网络边坡稳定性判别模型[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):230-234.
- [8] 刘杰,李建林,宛良朋,等.基于岩层参数贡献率分析的大岗山坝肩边坡模糊评判方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2835-2843.
- [9] 任刚,邢民,荆艳会,等.受控于结构面的岩质高边坡失稳预测技术研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):48-53.
- [10] Shi G H, Goodman R E. Two dimensional discontinuous deformation analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985,9(6):541-556.
- [11] Goodman R E, Shi G H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering[M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1985.
- [12] Shuhong W, Yong N, Ricardo V D, et al. Rock slope fracture process using a combined block theory and discontinuous deformation analysis approach based on the strength reduction method[J]. Disaster Advances, 2014,7(5):75-83.
- [13] 钟登华,鲁文妍,刘杰,等.复杂地质条件下地下洞室曲面块体地震响应分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(6):471-478.
- [14] 张敏思,黄润秋,王述红,等.基于网格划分的全空间块体识别方法及其工程应用[J].岩土工程学报,2016,38(3):477-485.
- [15] Zhou J, Chen Q, Wang J. Rigid block based lower bound limit analysis method for stability analysis of fractured rock mass considering rock bridge effects[J]. Computers and Geotechnics, 2017,86:173-180.
- [16] Wang S, Ni P, Guo M. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2013,38:357-367.
- [17] 王述红,高红岩,张紫杉.基于重度增加法的岩坡破坏过程流形元分析[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(3):403-407.
- [18] 王述红,杨勇,王洋,等.基于数字摄像测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3432-3438.
- [19] 王述红,张紫杉,王存根,等.岩体结构面产状随机分布空间表征[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(1):121-125.