

三维裂隙网络建模技术修正及其工程应用*

李冬伟,刘健,陈亮,成功,李炜强

(中核集团核工业北京地质研究院 环境工程研究所,北京 100029)

摘要:三维裂隙网络建模技术是分析地下硐室围岩中裂隙分布规律的技术手段之一,可为硐室稳定性评价提供基础模型。本文以北山坑探设施围岩为研究对象,利用地表裂隙调查结果,分析裂隙产状、直径和密度的概率密度特征,采用蒙特卡洛方法构建三维裂隙网络模型,并通过围岩楔形体分析检验模型。继而引入硐室裂隙编录数据,修正模型参数和建模方法,建立具有高可信度的三维裂隙网络模型。最后,利用修正模型实现巷道尺寸设计和危险部位预测。上述研究修正了三维裂隙网络建模技术,并提出了模型在硐室围岩稳定性评价和辅助设计领域的应用方案,为我国高放废物处置地下实验室及类似工程的研发提供了技术支撑。

关键词:三维裂隙网络;稳定性分析;辅助设计

中图分类号:TU457

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2020)05-1476-08

Optimization of 3D Discrete Fracture Network Modeling Technique and It's Application

Li Dongwei, Liu Jian, Chen Liang, Cheng Gong, Li Weiqiang

(CNNC/BRIUG Division of Environment Engineering, Beijing 100029, P.R. China)

Abstract: The 3D discrete fracture network (DFN) modeling is an effective method of revealing the 3D distribution characteristics of fractures in the surrounding rock mass of underground engineering, and the DFN model is one of the essential input data for the evaluation of stability of underground tunnel. In the paper, the DFN model of the surround rock mass of Beishan exploration tunnel (BET) was established, optimized and then applied in the wedge analysis. The probability distribution laws and parameters of fracture occurrence, diameter and density were firstly obtained by analyzing the outcrop survey results. The DFN model was then generated by Monte-Carlo simulation, and the validity of the DFN model was tested by the wedge analysis. In order to enhance the reliability of the DFN model, the tunnel mapping results of BET were imported to update the probability distribution parameters and to improve the modeling technique. Finally, the updated DFN model was successfully applied in the design of tunnel section and in the prediction of dangerous blocks. This paper improves the DFN modeling technique and proposes the approach of using the DFN model to evaluate local stability of underground tunnel and to optimize the design of underground engineering, and the achievement provides a technical means for the development of the underground research laboratory and other similar underground projects in China.

Keywords: 3D discrete fracture network; stability analysis; auxiliary design

0 引言

岩体中的结构面按其尺度可分为两类:断裂构

造和基岩节理裂隙(以下简称裂隙)^[1]。断裂构造直接控制地下工程的整体稳定性和安全性,在地下工程选址阶段需逐一调查研究。基岩裂隙控制地

* 收稿日期:2020-02-08(修改稿)

作者简介:李冬伟(1991—),男,安徽宿州人,硕士,工程师,主要从事高放废物地质处置方面的研究工作。

E-mail: ldw112245@163.com

基金项目:国防科工三废专项(科工二司[2014]306号)

下硐室局部稳定性,尺度小,但数量大,无法逐一调查。而受构造运动等影响,从统计意义上讲,岩体中的裂隙又服从一定的概率分布规律^[2]。因此,可利用统计分析手段分析获得裂隙概率分布模型和参数,继而借助 Monte Carlo 技术建立工程岩体的三维裂隙网络模型。在三维裂隙网络模拟和应用方面已有大量研究成果。于青春等^[3]借助钻孔裂隙数据对三维裂隙网络模型进行修正。马峰等^[2]从地表和钻孔两方面数据着手研究了三维裂隙网络建模技术及在渗流方面的应用。岳攀等^[4]利用钻孔摄像资料对露头裂隙数据进行有效补充与校正,并采用拉丁超立方抽样方法进行三维裂隙网络模拟。郭亮等^[5]在随机模型的基础上融入人工辨识的确定结构模式构建了“随机-确定”模型。李明超等^[6]研究了三维裂隙网络模拟在随机岩石块体支护分析中的应用。魏继红等^[7]研究了三维裂隙网络模拟和块体理论在隧道超挖预测方面的应用。

上述研究主要在改进三维裂隙网络模拟技术等方面取得了进展,但是没有在实际工程中得到充分的使用和验证。同时,在高放废物地质处置研究中,由于处置的长期安全性要求,三维裂隙网络具有更重要的地位和更高的要求。因此,在以往研究的基础上,以高放废物地质处置北山坑探设施为工程背景^[8],提出了三维裂隙网络建模技术修正方法,并探索了该方法在巷道尺寸设计和硐室危险部位预测方面的应用。

1 裂隙网络建模技术修正原理

1.1 基本原理

野外地质调研中,仅能够观测岩体出露裂隙,目前无法通过对地质岩体内的所有裂隙进行全面、详细的调研建立岩体的全真裂隙网络模型。现有技术最有效的方法是裂隙三维网络模拟技术。根据 Baecher 圆盘模型假设^[4],地质岩体中的裂隙可视为一个薄的圆盘,并假设:①圆盘直径、产状相互独立且具有分布特征;②圆盘直径与产状相互独立。三维网络模拟技术通过统计现场露头裂隙数据,收集裂隙样本,对裂隙各参数分析,获取裂隙分布的产状、直径、密度等参数的统计学分布特征,采用 Monte Carlo 方法模拟三维裂隙网络模型(图 1)。

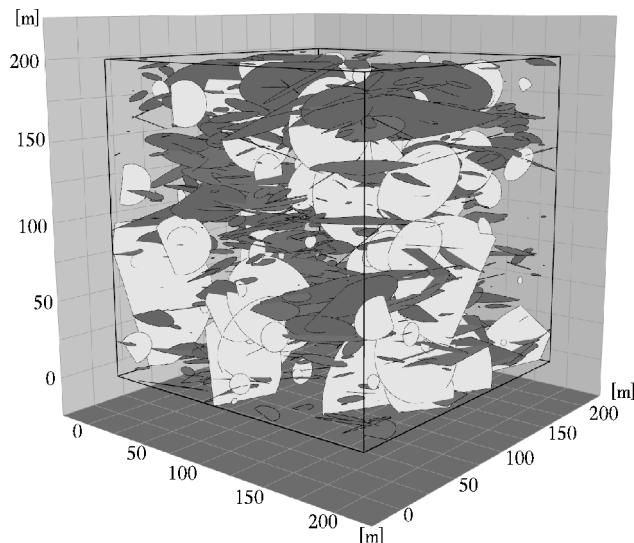


图 1 三维裂隙网络模型

Fig. 1 3D DFN model

1.2 楔形体稳定性分析方法

完整岩体被互相交错的结构面切割后易形成楔形体。巷道开挖后,临空楔形体可能因受力状态的改变而坠落、滑移,造成安全事故,如图 2。本文采用 Fracman 软件中的 Geomechanics 模块进行稳定性分析。根据楔形体稳定性可将其分为 3 类^[9]:

- (1) 坠落岩体:其稳定系数为 0;
- (2) 稳定岩体:其稳定系数为 100%;
- (3) 不稳定岩体:不稳定岩体可分为单面滑动岩体和双面滑动岩体。其稳定性系数计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i c_i + |N_i| \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1)$$

式中: A 为滑动面的面积; c 为滑动面内聚; N 为滑动面受到的压力; φ 为剪胀角; S 为剪切力。

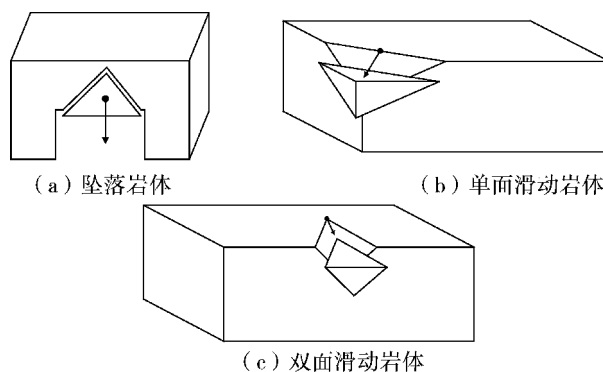


图 2 楔形体失稳示意图

Fig. 2 Structure diagram of the wedge's instability

1.3 技术修正方案

地下硐室围岩被互相交错的裂隙切割后易形成楔形体,围岩应力状态因开挖被迫改变,硐室围岩内的楔形体可能因力学条件的改变而坠落、滑移,造成围岩失稳事故。地下硐室的开挖为建模区岩体的调查提供了更多的裂隙数据和验证渠道,继而为三维裂隙网络模型的修正提供手段。

主要修正方案为:三维裂隙网络模型的几何参数与调研裂隙的几何参数具有统计上的相似性,调查建模区岩体露头裂隙,统计分析裂隙参数得到产状、密度、直径等参数的概率密度特征,利用 Monte Carlo 方法建立三维裂隙网络模型。对模型中的地下硐室进行楔形体稳定性分析,与实际开挖的硐室稳定性进行对比,检验模型的可靠性。引入硐室裂隙编录数据改进建模参数,修正模型,最终建立对工程具有指导意义的修正模型。主要修正流程图如图 3。

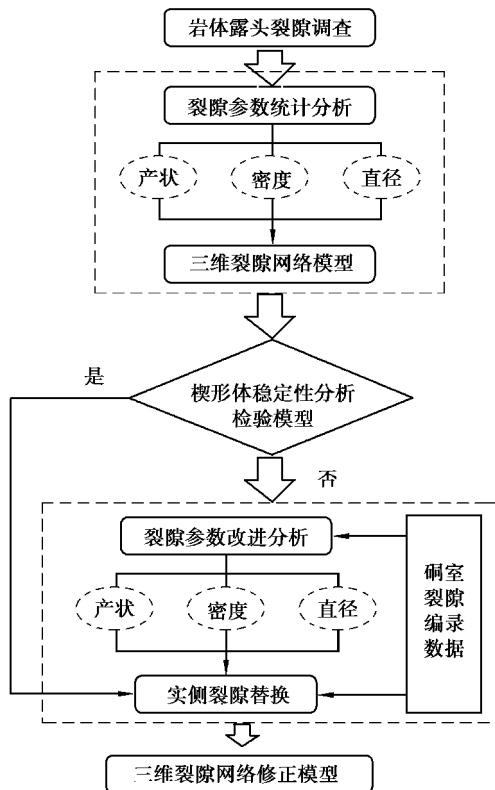


图 3 模型修正流程图

Fig. 3 Flow chart of model optimization

2 建模技术修正实例分析

2.1 工程概况

北山坑探设施位于甘肃北山十月井断裂带附近,围岩主要为花岗岩,硬度较大。北山坑探设施

周围地表植被少,裂隙清晰可见,易于开展裂隙调查。北山坑探设施主体结构主要由斜坡道、错车道和试验硐室组成,斜井总长度约 146.19 m,倾角为 20°,斜坡道断面为三心拱形式,宽 2.80 m,高 2.63 m,错车道和试验硐室埋深均为 50 m(图 4)。工程建设目的是为地下实验室开挖、监测、支护和不良地质体超前探测等技术研究提供实验平台,除极少数危险区域外,巷道不进行支护。

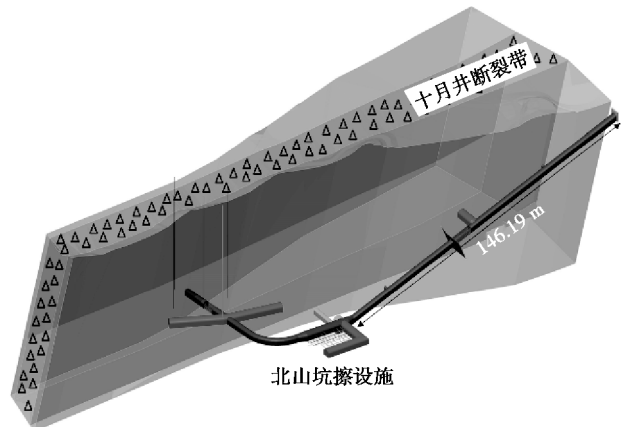


图 4 北山坑探设施结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of BET

2.2 模型构建与检验

2.2.1 现场裂隙调研

根据地质岩体露头裂隙显现情况,在北山坑探设施地表附近区域选取了 48 个露头区域开展裂隙调研,统计了 2 678 条裂隙参数数据作为分析样本。图 5 为北山坑探设施地表岩体露头分布示意图。

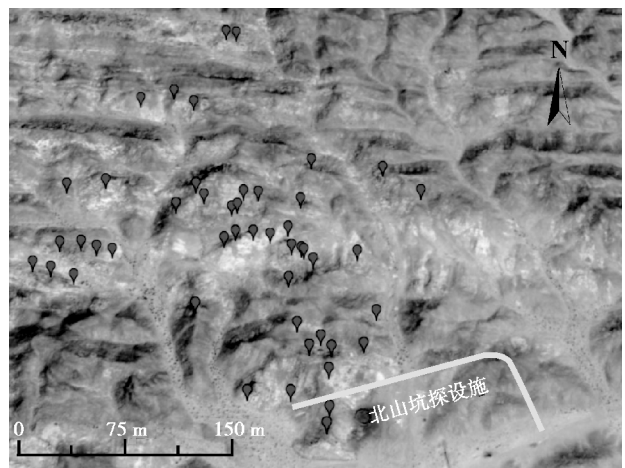


图 5 北山坑探设施周边岩体露头位置示意图

Fig. 5 Position of the rock outcrops around BET

2.2.2 产状分析

一定区域范围的岩体受相同的构造运动等因

素的影响,其裂隙的产状具有一定的规律性。对已调研的裂隙进行统计分析,作节理走向玫瑰花图和施密特投影等密度图(图 6)。文献[10]提出了一种改进的节理优势组产状计算方法。通过计算获得 3 组优势组:Set 1:282°∠76°(NNE 向)、Set 2:172°∠71°(Set 2, NEE 向)和 Set 3:49°∠37°(NW 向)。

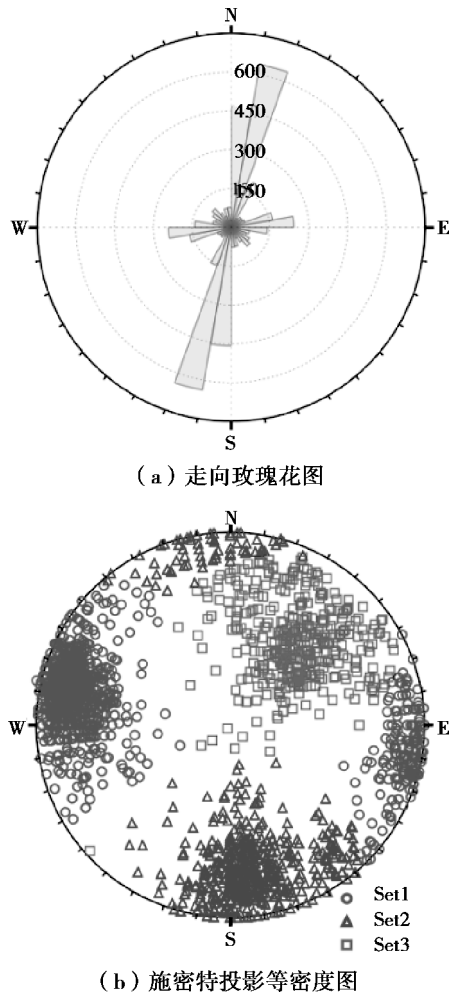


图 6 裂隙产状分布图

Fig. 6 Distribution of fractures

与 Fisher 分布模型相比, Elliptical-Fisher 模型考虑了裂隙产状分布的非圆形特征, 本文利用 Elliptical-Fisher 模型进行裂隙产状概率分布规律的数值描述。模型方程如下:

$$f(\varphi) = \frac{R\kappa \sin \varphi e^{\kappa \cos \varphi}}{2\pi(R^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)(e^\kappa - 1)} \quad (2)$$

式中: φ 为产状向量与最大概率方向夹角; θ 为在最大概率方向向量水平面投影与正北方向向量的夹角; κ 为离散系数; R 为产状分布的非圆形特征。对不同优势组裂隙产状数据进行拟合得到不同优势组裂隙产状分布特征参数(表 1)。

表 1 不同优势组裂隙产状分布特征参数
Table 1 The fracture occurrence in different dominant groups

优势组编号	裂隙数目	Elliptical-Fisher 产状模型		
		θ	κ	R
1	1517	1.00	33.5	0.79
2	725	89.5	14.7	1.24
3	436	98.5	11.0	1.28

2.2.3 直径分析

裂隙直径分布规律需要根据裂隙迹长分布推算获得。文献[11]提出了一种合理的裂隙迹长分布模型和直径分布模型的联合估算方法, 利用该方法对各优势裂隙组进行联合估算, 获得其裂隙分布模型。模型参数见表 2。

表 2 裂隙直径分布模型
Table 2 Diameter distribution model of fractures

优势组编号	分布模型	分布参数 μ	分布参数 σ
1	对数正态	1.922	0.493
2	伽马	2.208	0.249
3	对数正态	-4.700	2.190

注: 对数正态分布中 μ 为直径对数值的平均值, σ 为直径对数值的标准差; 伽马分布中 μ 为直径的平均值, σ 为直径的标准差。

2.2.4 裂隙密度分析

可以利用试算的方法^[12]求裂隙的密度。即以不同的裂隙密度试算值生成三维裂隙网络模型, 以实际露头面产状相同的面截取网络模型获取模型虚拟露头, 若模型虚拟露头密度最接近实际露头迹线密度, 则该试算值作为裂隙密度值。图 7 为试算模型虚拟露头截面图。

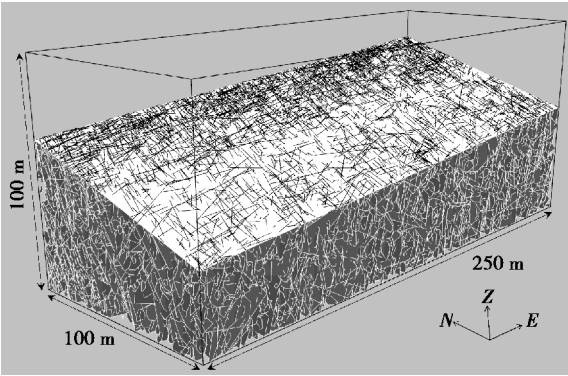


图 7 试算模型虚拟露头截面图

Fig. 7 Virtual outcrop section of trial model

采用该方法获得 3 个优势裂隙组体密度分别为: $0.010\ 06\ \text{m}^{-3}$, $0.007\ 71\ \text{m}^{-3}$, $0.001\ 00\ \text{m}^{-3}$ 。

2.2.5 模型检验

裂隙剪切行为采用 Mohr-Columb 模型进行描述,根据室内试验测试结果,粘聚力和内摩擦角分别取为 $1.86\ \text{MPa}$ 和 30.4° 。岩体密度取 $2.55\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

将北山坑探设施结构模型和裂隙参数带入 Fracman 软件中,建立北山坑探设施三维裂隙网络模型。利用 Fracman 软件的 Geomechanics 模块进行楔形体稳定性分析。模拟结果表明:斜坡道围岩中共发现 6 块楔形块体,无自由垮落块体,全部为稳定岩体。但是实测斜坡道存在两处冒顶(图 8),分析结果与实际斜坡道稳定性不一致,需对三维裂隙网络模型进行修正。



图 8 斜坡道三维激光扫描结果

Fig. 8 The result of 3D laser scanning for ramp

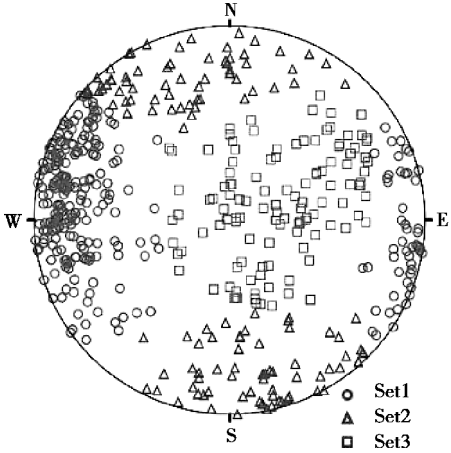
2.3 模型修正

2.3.1 参数分析与改进

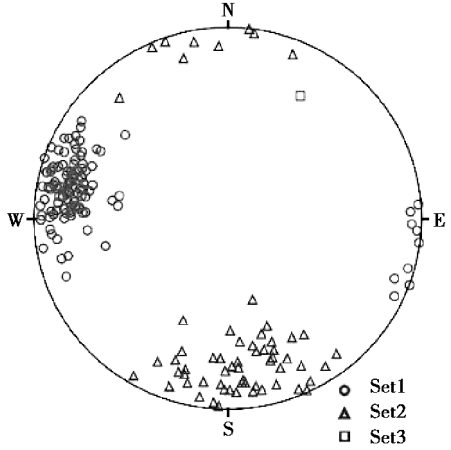
数量不够或取样不全面时,由样本统计分析获得的规律和参数会存在偏差。岩体二维露头面上采集的裂隙可能由于岩体风化、被植被覆盖等原因造成采样误差,导致模型的偏差。北山坑探设施开挖后,围岩不支护,并进行岩壁清洗,能够较全面地编录硐室围岩裂隙分布情况。为增加样本数量分析建模参数可靠性,对北山坑探设施斜坡道开挖揭露的裂隙进行编录。将斜坡道编录裂隙与斜坡道模拟裂隙的统计分布结果进行对比分析,如图 9 所示。

由图 9 可知,斜坡道中模拟裂隙与现场编录裂隙产状分布规律基本一致。因此,建模阶段由岩体露头裂隙调研统计分析的产状规律具有较高的可信度。但是,数值模拟结果中裂隙的数量明显少于斜坡道中编录裂隙的数量,表明对裂隙密度的统计分析可信度较低,需进行改进。另外,数值模拟结果各优势组裂隙数量比例与实际不符,set-3 裂隙

组所占比例明显偏低。因此,可将斜坡道各优势裂隙组编录数和模拟数的比值作为模型裂隙密度的放大倍数(表 3)。



(a) 编录裂隙施密特等密度图



(b) 模拟裂隙施密特等密度图

图 9 斜坡道编录裂隙和模拟裂隙分布对比图

Fig. 9 Distribution comparison of mapping fractures and simulating fractures in the ramp

表 3 裂隙密度放大倍数表

Table 3 Magnification of the fracture density

优势组编号	编录裂隙数	模拟裂隙数	密度放大倍数
set1	213	114	1.86
set2	162	88	1.84
set3	130	12	10.8

2.3.2 模型筛选

巷道围岩中的裂隙对楔形体稳定性起着关键作用。由 Monte-Carlo 模拟的裂隙在建模区域服从统计规律,但巷道围岩中的裂隙具有相对随机性。由改进参数产生 50 个模型,对斜坡道编录裂隙数

和模拟裂隙数进行对比(图 10),筛选出模型-47 为选用模型。

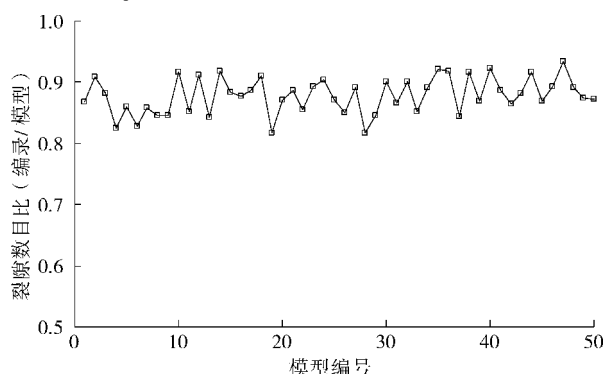


图 10 模型编录/模拟裂隙数目比

Fig. 10 Quantity ratio of mapping fractures and simulating fractures

2.3.3 实测裂隙替换

据上文可知,斜坡道编录裂隙统计特征与模拟裂隙统计特征一致。为进一步使模型的斜坡道围岩裂隙分布逼近真实,将数值模型与斜坡道相交的裂隙替换为现场编录裂隙。这种替换能最大程度保留实际观测信息,大大地增加斜坡道围岩中的三维裂隙的可信度。替换后的修正模型如图 11 所示。

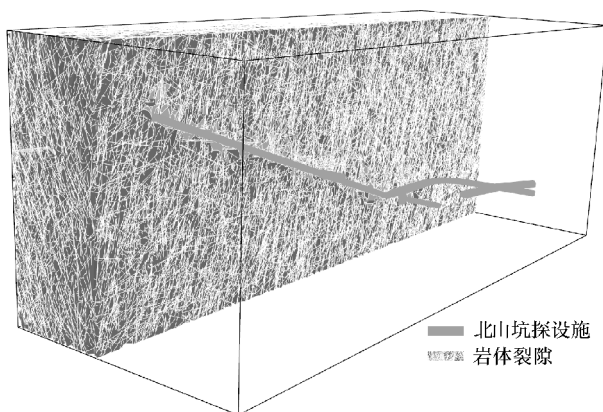


图 11 修正模型剖视图

Fig. 11 Sectional view of optimized model

2.4 围岩稳定性分析

对上节修正的模型在 Fracman 软件的 Geomechanics 模块内进行楔形体稳定性分析,斜坡道开挖过程中在进尺 35 m 和 80 m 处有冒顶现象,计算结果在 35 m、80 m 附近区域显示处存在危险块体,二者具有很好的对应性(图 12)。因此,修正模型在硐室围岩稳定性分析方面可行度较高。

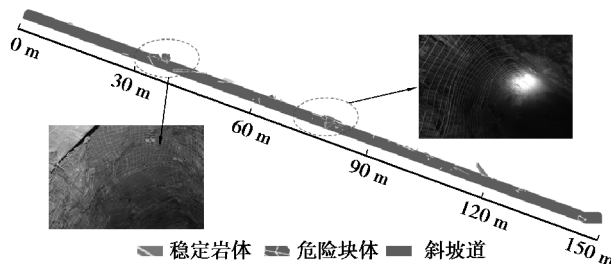


图 12 修正模型斜坡道稳定性分析结果

Fig. 12 Ramp stability analysis results in optimized model

3 工程应用探索

3.1 巷道断面尺寸设计

巷道断面尺寸设计除考虑其功能需求外,还需要考虑不同尺寸断面对围岩稳定性的影响,修正模型可为尺寸设计提供帮助。为满足行人和矿车需求,斜坡道最小设计宽度为 2.8 m。在修正模型中分别以 2.8 m、3.3 m、3.8 m、4.3 m、4.8 m 为巷道宽度对斜坡道围岩稳定性进行模拟,结果如表 4 所示。由表 4 可知,随着巷道宽度的增加,块体总数和坠落块体数总体呈现增加趋势,但与 2.8 m 宽的巷道相比,3.3 m 宽巷道块体坠落块体数未增加,不稳定块体数明显减少,从巷道围岩稳定性的角度而言,3.3 m 宽巷道更合理。需要说明的是:本论文模型修正需要已开挖硐室裂隙编录数据作为样本,巷道辅助设计时,巷道还未开挖。可利用超前钻孔探测和编录巷道围岩中的裂隙进行三维裂隙网络建模,继而开展辅助设计研究。

表 4 不同巷道宽度模拟结果

Table 4 Simulation results of tunnels with different widths

序号	巷道宽度	块体数	坠落块体数	不稳定块体数
1	2.8	143	6	22
2	3.3	159	6	9
3	3.8	282	12	18
4	4.3	437	20	34
5	4.8	571	15	36

3.2 巷道危险部位预测

除硐室开挖导致的顶板冒落、片帮外,地下硐室在维护期间围岩中不稳定的岩体可能坠落,而这类事件往往无预兆,具有突发性,易造成安全事故。目前,地下工程中常用“敲帮问顶”的方式排除安全隐患。图 13 为北山坑探设施斜坡道维护期间通过“敲帮问顶”排除的安全隐患。但该方法需要操作员具有一定的实践经验,全盘排查,效率较低。

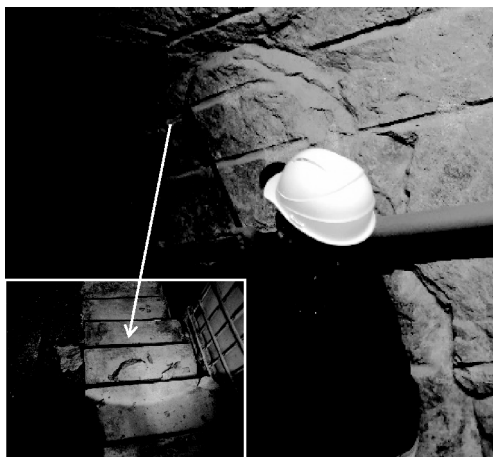


图13 北山坑探设施安全隐患排查

Fig. 13 Hidden dangers screening of BET

本文研究的三维裂隙网络模型楔形体稳定性分析可搜索地下洞室中的危险块体的位置,将危险块体周围的区域定为危险区域,从而进行重点隐患排查。根据模拟结果,北山坑探设施斜坡道中除已冒顶区域外,60~65 m、130 m 和 146 m 处存在危险块体(图 14),在“敲帮问顶”时应作为重点排查对象。

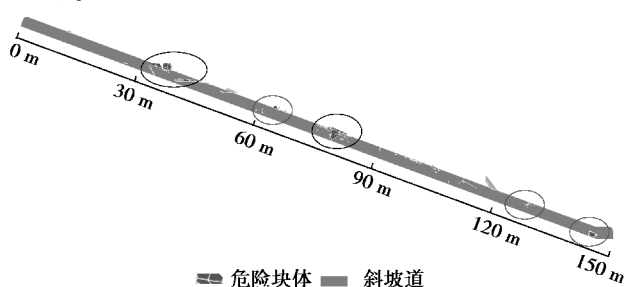


图14 斜坡道预测危险区域

Fig. 14 Predicted dangerous zone in the ramp

4 结论与讨论

以北山坑探设施为例,通过围岩楔形体分析修正了三位裂隙建模技术并探索修正模型在工程稳定上的应用。主要结论如下:

(1) 三维裂隙网络建模修正主要方法为:利用地表露头裂隙统计特征建立模型,利用楔形体稳定性分析方法检验模型可信度,引入地下洞室编录信息对模型参数进行修正。修正模型斜坡道围岩稳定性分析表明:修正模型斜坡道围岩失稳特征与实测对应性好,修正模型可信度高,可用于围岩稳定性分析。

(2) 探索了裂隙网络修正模型在巷道断面尺寸设计、危险部位预测两方面的应用价值。结果表

明:修正模型可在巷道断面尺寸设计给出建设性建议,可预测巷道使用期间的危险部位,具有工程指导意义。

本文研究表明了修正模型在工程稳定性领域应用的可行性。但仍存在三维裂隙网络模型不够精确、工程应用具有局限性等不足之处,下一步将在以下几个方面开展深入研究:借助无人机摄影和三维激光扫描等技术修正裂隙调研方法,提高基础数据可靠性;探索三维裂隙网络模型在地下工程辅助设计其他方面的应用,如巷道断面形状设计、布置形式设计、支护设计等方面。

参考文献 (References)

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979. (Gu Dezhen. Basics of rock engineering geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese))
- [2] 马峰, 白凤怀, 陈刚, 等. 黄岛地下水封洞库库区三维裂隙网络模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3421-3427. (Ma Feng, Bai Fenghuai, Chen Gang, et al. Three-dimensional fracture network simulation in Huangdao water sealed caverns area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.2): 3421-3427. (in Chinese))
- [3] 于青春, 大西有三. 岩体三维不连续裂隙网络及其逆建模方法[J]. 地球科学, 2003, 28(5): 522-526, 544. (Yu Qingchun, Yuzo Ohnishi. Three-dimensional discrete fracture network model and its inverse method[J]. Earth Science, 2003, 28(5): 522-526, 544. (in Chinese))
- [4] 岳攀, 钟登华, 吴含, 等. 基于LHS的坝基岩体三维裂隙网络模拟[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 93-102. (Yue Pan, Zhong Denghua, Wu Han, et al. Simulations of 3-D fracture networks in rock mass of dam foundation using Latin hypercube sampling[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 93-102. (in Chinese))
- [5] 郭亮, 李晓昭, 周扬一, 等. 随机与确定耦合的裂隙岩体结构面三维网络模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2636-2644, 2653. (Guo Liang, Li Xiaozhao, Zhou Yangyi, et al. Three-dimensional network simulation of fractured rock mass discontinuities based on stochastic-deterministic coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2636-2644, 2653. (in Chinese))
- [6] 李明超, 张野, 周四宝. 基于岩体三维裂隙网络模型的随机块体稳定分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(4): 331-338. (Li

- Mingchao, Zhang Ye, Zhou Sibao. Stability analysis of stochastic rock blocks based on three-dimensional fracture network rock mass structure model[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology Edution), 2018, 51(4): 331-338.(in Chinese))
- [7] 魏继红, 孙少锐, 彭建忠, 等. 高速公路连拱隧道超挖预测及评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增 1): 3324-3329. (Wei Jihong, Sun Shaoyue, Peng Jianzhong, et al. Study on forecasting and evaluation of overbreak in double-arch tunnels of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Supp. 1): 3324-3329. (in Chinese))
- [8] Wang J, Chen L, Su R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [9] Goodman R E, Shi G. Block theory and its application to rock engineering [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [10] 刘健, 李珊珊, 陈亮, 等. 一种改进的节理初始优势产状计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (5): 1053-1058. (Liu Jian, Li Shanshan, Chen Liang, et al. A modified method of selecting initial centers of joint orientation data [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (5): 1053-1058.(in Chinese))
- [11] 刘健. 地下实验室围岩力学和长期稳定性研究[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2016. (Liu Jian. Study on mechanics and long-term stability of surrounding rock in underground research laboratory[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2016. (in Chinese))
- [12] 刘畅. 大藤峡泄水闸坝基岩体的三维裂隙网络模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. (Liu Chang. Three-dimensional fracture network modeling of the rock mass for Datengxia water release gate foundation [D]. Changchun: Jilin University, 2017.(in Chinese))

(上接第 1458 页)

- (Dai Xin, Xu Xei, Zou Li, et al. Numerical simulation of shafts during excavation process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Supp.1): 154-157.(in Chinese))
- [10] 靳晓光, 李晓红. 高地应力区深埋隧道软弱围岩支护结构力学特性研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 101-105. (Jin Xiaoguang, Li Xiaohong. Study on mechanical properties of support structure of deep buried tunnel soft and weak surrounding rock in high situ stress area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 101-105.(in Chinese))
- [11] 李鹏飞, 田四明, 赵勇, 等. 高地应力软弱围岩隧道初期支护受力特性的现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3509-3519. (Li Pengfei, Tian Siming, Zhao Yong, et al. In-situ monitoring study of echanical characteristics of primary lining in weak rock tunnel with high grostress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 32 (Supp. 2): 3509-3519.(in Chinese))
- [12] 张梅, 何志军, 张民庆, 等. 高地应力软岩隧道变形控制设计与施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (6): 13-22. (Zhang Mei, He Zhijun, Zhang Mingqin, et al. Design and construction technologies to control the deformation of a soft rock tunnel with high ground stress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(6): 13-22.(in Chinese))
- [13] 四川交通运输厅交通勘察设计研究院. 米仓山隧道施工图设计说明 [R]. 2011. (Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Construction design instructions for Micangshan tunnel [R]. 2011. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范 (JTG 3370.1-2018) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for design of highway tunnel (JTG 3370. 1-2018) [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.(in Chinese))
- [15] Hoek E, Browne E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, 106(9): 1013-1035.
- [16] Hoek E, Browne E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 34(8): 1165-1186.