

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2312

裂隙岩体块体化程度评价方法的若干问题修正

陈庆发^{1,2}, 牛文静², 郑文师^{1,2}, 刘俊广¹, 尹庭昌^{1,2}, 范秋雁¹

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 块体化程度是评价岩体完整性的一种新指标, 能从三维角度表征岩体破碎程度, 但目前该方法仍存在未充分考虑岩体切割程度及块体规模、未限定基础应用条件、块体化程度等级划分不合理等缺陷。针对上述缺陷, 深入分析了其产生原因, 并借鉴岩体切割程度、三维块度模数、体积 *RQD* 等计算原理, 限定了块体体积百分比相关概念, 提出了考虑岩体完整性块度尺寸效应的块体体积综合百分比计算方法, 确立了块体化程度等级及分级指标取值依据, 建立了修正的块体化程度评价方法。通过对比块体化程度评价修正方法、岩土工程规范对岩体完整性的划分结果, 分析了修正方法的合理性。分别以广西铜坑矿锌多金属矿体、乌东德水电工程的块体研究数据为基础, 开展了修正块体化程度评价方法的实例验证, 结果表明: 利用修正块体化程度评价方法计算的铜坑矿+255 m中段4#试验区岩体块体体积百分比为11.18%, 属轻度块状化岩体; 乌东德水电站PD49-1平硐、PD4支硐块体体积百分比分别为12.847%、10.168%, 均属于轻度块状化岩体, 岩体完整性程度为较完整级别。与现有块体化程度评价方法比较, 修正方法计算的块体体积百分比能够更准确地从三维角度表征真实岩体的完整性。研究成果对精确刻画岩体三维完整性具有重要意义。

关键词: 裂隙岩体; 块体化程度评价方法; 块体体积百分比; 缺陷修正; 岩体完整性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)07-0000-08

Correction of some problems in blockiness evaluation method in fractured rock mass

CHEN Qing-fa^{1,2}, NIU Wen-jing², ZHENG Wen-shi^{1,2}, LIU Jun-guang¹, YIN Ting-chang^{1,2}, FAN Qiu-yan¹

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Blockiness is a new index to evaluate the integrity of rock mass, and it can represent the degree of rock mass fracturing in three dimensions. However, the current blockiness evaluation method is limited due to the fail to consider the cutting degree of rock mass and the size of the block, the unclear basic application conditions, the unreasonable ratings of blockiness levels and so on. In this study, the causes of these limitations were analyzed. Referring to the calculation principles of the degree of rock mass cutting, three-dimensional block modulus and volume *RQD*, the concept of block volume percentage was defined, a comprehensive percentage calculation method of block volume (in which the scale effect of rock blocks is considered) was proposed, the basics of the ratings of blockiness levels and the values of the classification index were determined, and the improved blockiness evaluation method was developed. By comparing the rating results of the modified blockiness evaluation method and the Chinese code for geotechnical engineering, the rationality of the modified blockiness evaluation method was supported. Based on the block data of the Tongkeng Zn polymetallic orebody and Wudongde Hydropower Project, the case studies of the modified blockiness evaluation method were conducted. The results show that: the block volume percentage of No. 4 test area at the 255 m level in the Tongkeng Zn polymetallic orebody, which was calculated by the modified block evaluation method, is 11.18%, belonging to slight-blockiness category; the block volume percentages of the rock masses of the PD49-1 adit and PD4 branch adit in Wudongde Hydropower Station are 12.847% and 10.168%, respectively, which belong to slight-blockiness categories, and the intactness degree of the rock masses is moderately integrated. The block volume percentage calculated by the modified blockiness evaluation method, which can represent

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41402306); 广西自然科学基金重点项目(No. 2014GXNSFDA118034); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 1598017-5); 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(No. Z016015)。

Supported by the Young Foundation of the National Natural Science of China (41402306), the Key Projects of Guangxi Province Natural Science Foundation (2014GXNSFDA118034), the Scientific Research & Technological Development Projects of Guangxi (1598017-5) and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (Z016015).

第一作者简介: 陈庆发, 男, 1979年生, 博士, 教授, 主要从事矿山岩石力学和非传统采矿理论的研究与教学工作。E-mail: chqf98121@163.com

the integrity of the rock mass from three-dimensional perspective, is more accurate than the conventional blockiness evaluation method. The findings of this study are significant for the accurate characterization of three-dimensional rock mass integrity.

Keywords: fractured rock mass; blockiness evaluation method; block volume percentage; defect correction; rock mass integrity

1 引言

岩体是具有一定组分和结构的地质体,存在于岩体内的断层、软弱层面、大多数节理、软弱片理和软弱带等众多结构面,将岩体切割成大小不一、组合方式不同的岩块^[1]。赋存于岩体内的块体数量及规模体现了岩体的块体化程度,不同的块体化程度对应的岩体完整性不同,进而对岩体强度和稳定性影响也不同。《工程岩体分级标准》^[3]将岩体完整性作为评价岩体质量的基础指标,因此,开展岩体块体化程度相关研究对促进岩体完整性三维表征具有重要意义。

岩体完整性表征指标较多,代表性的有岩石质量指标 RQD 、体积节理数 J_V 、岩体完整性指数 K_V 等^[2-4]。但 RQD 不具任意方向性且耗费时间和资金, J_V 未考虑裂隙延展性对岩体完整性影响, K_V 表征岩体完整性时受人为主观因素影响较大^[5]。因此,一些学者从不同角度开展了岩体完整性表征研究,如: Sen 等^[6]提出体积 RQD 概念表征岩体完整性,但因体积 RQD 计算方法应用条件苛刻且仅适用不强而未大量推广使用;陈德基等^[7]提出块度模数概念,从二维角度用不同尺寸块体组合及其出现概率优势表征岩体完整性,但块度模数不能体现大体积块体占总岩体的比重;张奇华等^[8]采用全空间块体搜索技术,通过判断岩体被切割程度分析岩体完整性,但岩体切割程度与岩体完整性级别没有建立具体对应关系;王川婴等^[9]应用钻孔摄像技术,提出了岩体完整性评价的 $RMDI$ 法,但该方法需布置较多钻孔且耗费资金。此后,刘晓非^[10]提出块体化程度评价方法,从三维角度量化岩体被视为孤立块体体系程度,为岩体完整性分析提供基础。基于块体化程度评价方法, Xia 等^[11]分析了长江三峡地下电站厂房岩体完整性程度;王晓明^[12]分析了乌东德水电工程坝区岩体块体化程度;陈庆发等^[13]提出了一种基于块体化程度理论的岩体质量分级方法。但现有块体化程度评价方法也因存在未充分考虑岩体切割程度及块体规模、未限定应用条件、等级划分不合理等缺点,使其不能较准确表征岩体真实块体化程度。

为使块体化程度评价方法能真实地反映岩体完整性,本文深入分析现有块体化程度评价方法存在的缺陷,并结合岩体完整性表征指标计算原理,从基础概念、应用条件、等级划分等方面针对性开

展块体化程度评价方法修正研究。

2 块体化程度评价方法缺陷分析

2.1 未充分考虑岩体切割程度及块体规模

块体体积百分比作为块体化程度的量化指标,其定义为:岩体中被裂隙切割形成块体的体积与岩体总体积的比值,取值范围为 $0\sim 100\%$ 。块体体积百分比越小,越接近于 0 时,岩体完整性越好;块体体积百分比越大,越接近 1 时,岩体被裂隙切割越严重,完整性越差。

但对于块体体积百分比比较高的岩体,其内部块体可能由极少量大体积块体组成,也可能是由大量小体积块体组成,且两者均满足 d_{60} 存在的条件。依照块体化程度分级标准,两者均为块状化岩体,如图 1 所示。实际上,仅前者岩体较破碎,而后者岩体完整性较好,显然与实际情况不相符。

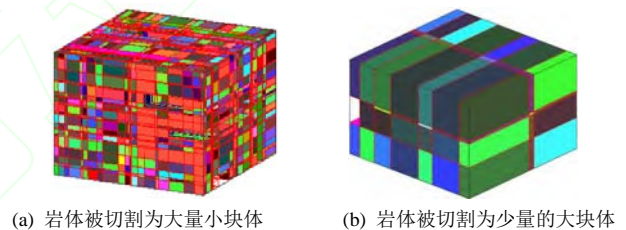


图 1 块体体积百分较大岩体完整性对比

Fig.1 Contrast of rock mass integrity with the larger block volume percentage

将块体体积百分比与表征岩体完整性的岩体切割程度、体积 RQD 等分别对比分析,也证明了块体体积百分比存在概念模糊、定义不明确的缺陷。

(1) 从岩体切割程度角度,裂隙迹长与间距比越小,切割程度越低,岩体内越易出现大体积块体,岩体完整性也越好。但依据块体化程度评价方法计算的块体体积百分比将因大体积块体的存在而偏大,导致得出岩体完整性较差的错误结论。

(2) 从体积 RQD 角度,岩体中大体积块体越多,其完整性越好。但现有块体化程度评价方法只将岩体内块体体积加和,未充分考虑块体规模,且定义岩体内块体的总体积越大,岩体完整性越差。因而当岩体内存在体积较大的块体时,其表征的岩体完整性结果与体积 RQD 表征结果截然相反,且与实际情况不符。

因此,块体体积百分比的定义缺少考虑岩体切

割程度及块体规模等因素,只有当岩体切割完全时,块体体积百分比量化的块体化程度才与实际较为相符;岩体切割不完全时,块体体积百分比量化的块体化程度可能与实际情况相差较大。

2.2 未限定应用条件

(1) 岩体尺度

三维裂隙网络模拟^[14]是计算块体体积百分比的重要环节,当在岩体内模拟随机裂隙时,必须预先确定岩体结构均质区^[15]。但现有块体化程度评价方法未明确涉及岩体尺度问题,若模拟区域尺寸超过均质区,将使得块体化程度计算结果与实际不符。

(2) 边界条件及块体类型

现有块体化程度评价方法未明确限定岩体边界条件以及块体类型,将导致块体总体积与岩体体积相等(即 $\sum_{i=1}^n v_i = V$),且岩体块体化程度计算结果

比真实岩体差的现象。图 2 为受 3 组随机正交裂隙切割的岩体三维裂隙网络模型。利用 GeneralBlock 软件进行块体识别,当不剔除假想面参与形成的块体时(见图 3(a)),计算的块体体积百分比为 100%;当利用 3DMine 软件剔除掉边界假想面参与形成的块体后(见图 3(b)),计算的块体体积百分比为 35%。

显然,只有在计算块体体积百分比过程中剔除有假想结构面(边界面)参与产生的块体时,块体体积百分比才能较为准确的量化岩体块体化程度。

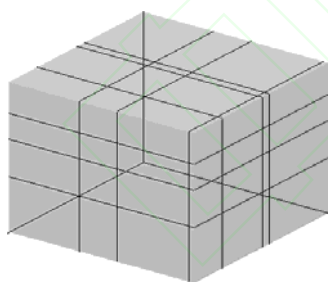
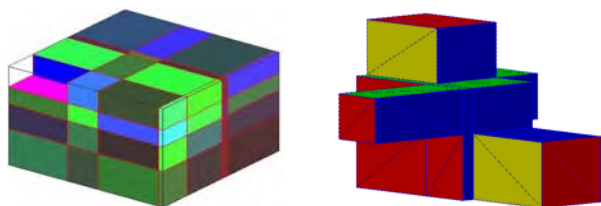


图 2 块体体积百分比大岩体

Fig.2 The rock mass of large block volume percentage



(a) 未剔除假想面参与形成的块体 (b) 剔除了假想面参与形成的块体

图 3 同一岩体内的不同类型块体

Fig.3 Different types of blocks in the same rock body

(3) 结构面类型

结构面类型对三维裂隙网络模拟具有很大影响,单独用随机裂隙或确定性裂隙切割岩体时,块体化程度与计算结果较符合。当同时使用随机裂隙和确定性裂隙时,岩体会因确定性裂隙的存在而被切割为结构复杂、规模多变的块体,致使计算的块体体积百分比结果与实际差别较大。但现有块体化程度评价方法未对结构面类型进行限定,这一缺陷将会对岩体块体化程度计算结果产生不良影响。

2.3 块体化程度等级划分不合理

块体化程度是于表征岩体完整性的指标,因此,要求其等级划分应能够对应确定岩体完整性。岩体完整性程度被划分为 5 个等级,但块体化程度评价方法考虑了岩体内部形成块体情况,结合块体体积曲线中的 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 将岩体块体化程度划分为 4 个等级(见表 1),不仅缺乏可靠理论依据且不能较好与岩体完整程度等级相匹配。

块体化程度评价方法参考土粒粒径级配曲线,通过引入块体体积曲线反映岩体内形成块体数量及各块体体积差距。但当岩体块体化程度高时,块体体积分布离散性小,块体体积曲线较连续;当岩体块体化程度低时,块体体积分布离散,块体体积曲线连续性差。因此,在块体化程度分级时,并未实质性利用其体现块体块度性质。块体体积百分比 $B < 10\%$ 时, d_{10} 不存在; $B < 60\%$ 时, d_{60} 不存在,故块体化程度分级标准中 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 存在情况与块体体积百分比本质属交叉内容,并不能补充限定岩体块体化程度所处级别。

表 1 裂隙岩体块体化程度分级表

Table 1 Blockiness classification of fractured rock mass

块体体积百分比/%	d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 存在情况	块体化程度分类描述
0~10	d_{10} 不存在	非块状化岩体
10~30	d_{10} 存在, d_{30} 不存在	轻度块状化岩体
30~60	d_{30} 存在, d_{60} 不存在	中度块状化岩体
60~100	d_{60} 存在	块状化岩体

3 块体化程度评价方法缺陷修正

3.1 块体体积百分比相关概念修正

借鉴岩体切割程度、块度模数计算原理^[7-8]对块体化程度评价方法存在的未充分考虑岩体切割程度及块体规模的缺陷进行修正。

由文献[8]可知,当裂隙迹长与间距的比值较大时,岩体被结构面切割程度较高,岩体内形成的块体块度大小分布集中。反之,则岩体受裂隙切割程度较低,岩体内有大量大体积块体产生,且块体块

度分布离散。此外，岩体存在一定的完整性块度尺寸效应^[9, 16]，即大体积块体对岩体完整性劣化程度较低，小体积块体对岩体完整性劣化程度较高。

因此，利用块体体积百分比表征岩体的块体化程度时，为避免块度规模对岩体块体化程度计算的不良影响，需考虑岩体完整性的块度尺寸效应。即，首先分别计算不同块度范围的块体体积百分比，然后用对应的岩体完整性块度尺寸效应系数对块体体积百分比进行折减，最后通过求和获得岩体的块体体积综合百分比。

参照岩体完整性定性划分标准^[3]、岩体块度模数^[7]、岩体块度大小及相应尺寸效应^[9, 16]等，将岩体内的块体划分为 0~0.008 m³、0.008~0.030 m³、0.03~0.20 m³、0.2~1.0 m³、>1.0 m³ 等 5 个块度范围，并参照块度模数计算思想及原理，计算块体体积综合百分比 B_z

$$B_z = B_1 + \frac{1}{2}B_2 + \frac{1}{3}B_3 + \frac{1}{4}B_4 + \frac{1}{5}B_5 \quad (1)$$

式中： B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 分别为体积处于 0~0.008 m³、0.008~0.030 m³、0.03~0.20 m³、0.2~1.0 m³、>1.0 m³ 的块体占岩体总体积的比重。

3.2 块体类型及边界条件限定

岩体结构统计均质区划分为裂隙三维网络模拟的基础，因此，构建的三维岩体模型尺寸必须小于岩体结构均质区。基于构建的裂隙岩体三维结构网络模型，设置属性限制其边界条件^[17]，使得计算过程中能够识别出块体类型，并在统计块体体积百分比时剔除有假想结构面参与形成的块体。由于块体化程度评价方法中的有效块体仅为完全由裂隙圈闭形成的块体，因而块体总体积与岩体体积不相等，且块体体积百分比可为 0。

进行裂隙三维网络模拟时，输入岩体内的裂隙可以单独为实测的确定性裂隙或模拟的随机性裂隙，但裂隙的各类参数需预先准确确立。

3.3 块体化程度等级划分修正

岩体完整性分为 5 级，为与之对应，块体化程度也应相应划分为 5 级。完整性指数与岩体完整程度有一定的对应关系，而完整性指数与体积 RQD 有一定对应关系^[18]。因此，利用块体化程度（块体体积百分比）与体积 RQD 、完整性系数间的内在关系可以划分块体化程度等级。

岩体体积 RQD 与体积节理数 J_v 存在一定的理论关系^[19]，

$$RQD_v = 100e^{-0.1J_v} (1 + 0.1J_v) \quad (2)$$

基于文献^[3]中确立的节理体积数 J_v 与岩体完

整性指数 K_v 的对应关系，拟合 K_v 与 J_v 的函数关系，如图 4 所示。由图 4 可知，岩体完整性系数与体积节理数的函数关系为

$$K_v = 0.95648 \times 0.94666^{J_v} \quad (3)$$

从体积 RQD 角度，岩体中体积超过 0.001 m³ 的块体越多，岩体完整性越好。块体体积百分比量块体化程度时恰好与体积 RQD 相反，岩体内块体越多，岩体完整性越差。根据体积 RQD 与块体体积百分比的定义可得出块体体积百分比与体积 RQD 近似存在 $B = 1 - 0.01RQD_v$ 的关系，且块体体积百分比取值范围为 [0, 100%]。据此可推导出块体体积百分比与岩体完整性系数的函数关系为

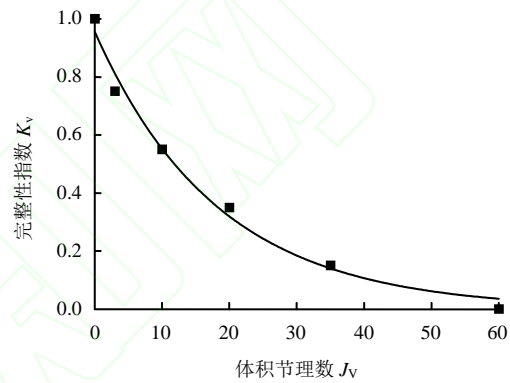


图 4 体积节理数与岩体完整性的函数关系

Fig.4 The function relation between volume joint number and rock mass integrity

$$B = 1 - \left(1 + 0.1 \times \lg_{0.9467} \frac{K_v}{0.9565} \right) e^{-0.1 \times \lg_{0.9467} \frac{K_v}{0.9565}} \quad (4)$$

绘制式 (4) 的函数图形，如图 5 所示。岩体的完整性指数 K_v 为 0~0.15、0.15~0.35、0.35~0.55、0.55~0.75、0.75~1.00 时，对应完整性为极破碎、破碎、较破碎、较完整和完整。

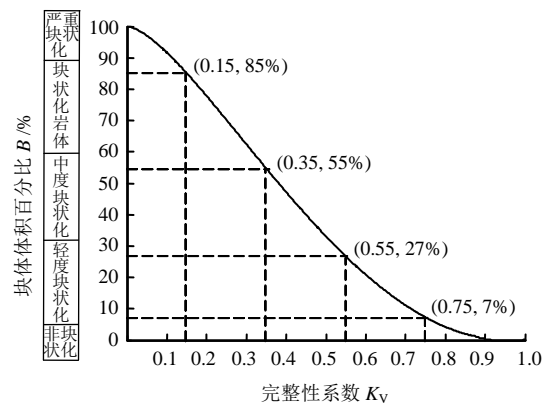


图 5 块体体积百分比与岩体完整性函数关系图

Fig.5 The function relation between block volume percentage and rock mass integrity

利用式 (4) 计算出 K_V 为 0.15、0.35、0.55、0.75 时，对应的块体体积百分比分别为 85%、55%、27% 和 7%。因此，可将岩体块体化程度划分为非块状化岩体、轻度块状化岩体、中度块状化岩体、块状化岩体和严重块状化岩体 5 个级别，每个级别对应的块体体积百分比范围分别为 0~7%、7%~27%、27%~55%、55%~85%、85%~100%。

4 修正的块体化程度评价方法

4.1 基础条件

一般块体理论为块体化程度评价方法的基础，因此，块体化程度评价方法需满足一般块体理论的各类假设条件。计算块体体积百分比时，只统计岩体中完全由裂隙切割形成块体的体积，剔除假想结构面（研究区域边界）参与形成的块体。此外，利用块体体积百分比量化块体化程度时，必须基于以下条件：

- (1) 所计算的岩体尺寸不大于均质区范围；
- (2) 块体总体积与岩体体积不相等，且块体体积百分比可为 0；
- (3) 能够通过设置边界条件使软件识别出假想结构面参与形成的块体，以便于在计算块体体积百分比时将其剔除。
- (4) 岩体内的裂隙可单独为实测的确定性裂隙也可作为模拟的随机裂隙，但各类裂隙间距、长度、产状等参数的分布形式及大小需严格确立。

4.2 计算流程

修正的块体化程度评价方法具体计算流程为：

首先，在选定的研究区域开展结构面数据调查，并利用 DIPS 软件等统计、分析结构面数据；其次，根据结构面分布规律及岩体物理力学性质，确定统计均质区大小；然后，基于均质区尺寸，构建三维岩体模型，进行三维裂隙网络模拟，并解算和识别赋存于岩体内的块体；进而，分别计算各块度范围的块体体积百分比及岩体的块体体积综合百分比；最后，综合确定岩体块体化程度级别。

具体流程如图 6 所示。

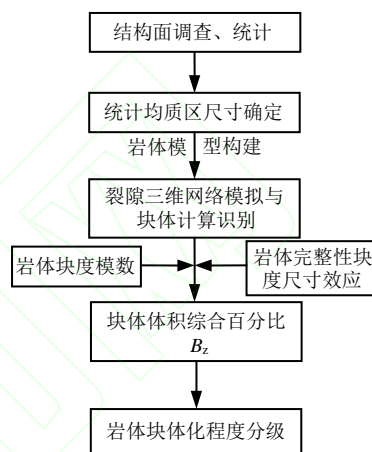


图 6 修正的块体化程度评价方法计算流程图
Fig.6 The mind map of blockiness theory correction

4.3 块体化程度分级标准

参考现有块体化程度分级标准，并依据块体化程度等级划分修正结果，建立修正的裂隙岩体块体化程度分级标准，如表 2 所示。

表 2 修正的裂隙岩体块体化程度分级标准表

Table 2 The improved blockiness classification of fractured rock mass

块体体积百分比/%	块体化程度分级	工程地质特征
<7	非块状化岩体	结构面间距较大，结构面结合程度好或一般，岩体呈整体状或巨厚层状结构
7~27	轻度块状化岩体	结构面发育程度较好，结合程度好或一般，岩体呈块状或厚层状结构
27~55	中度块状化岩体	有多组较发育的结构面，结合程度差或一般，岩体呈块状或镶嵌碎裂状结构
55~85	块状化岩体	有多组发育的结构面，结合程度较差，岩体呈块状或碎裂状结构
≥85	严重块状化岩体	有较多杂乱无序的结构面，且结合程度很差，岩体被结构面切割成散体状结构

5 修正方法的合理性分析

选取相同结构面延展性、不同间距组合的 6 种岩体模型，利用修正的块体化程度评价方法表征其完整性，并通过与各类《规范》对岩体完整性定性划分结果的对比，分析修正方法的合理性。

基于各岩体模型的结构面参数（见表 3），利用 GeneralBlock 软件构建岩体三维结构模型，如图 7 所示。

表 3 各岩体的结构面参数

Table 3 The structural plane parameters of rock mass

岩体模型	不同结构面参数组合岩体模	直径 /m	间距 /m	密度	组数
a	非常高延展性-很密间距	40	0.04	0.019 9	3
b	非常高延展性-密间距	40	0.13	0.006 1	3
c	非常高延展性-中等间距	40	0.40	0.002 0	3
d	非常高延展性-宽间距	40	1.30	0.000 6	3
e	非常高延展性-很宽间距	40	4.00	0.000 2	3
f	非常高延展性-极宽间距	40	6.00	0.000 1	3

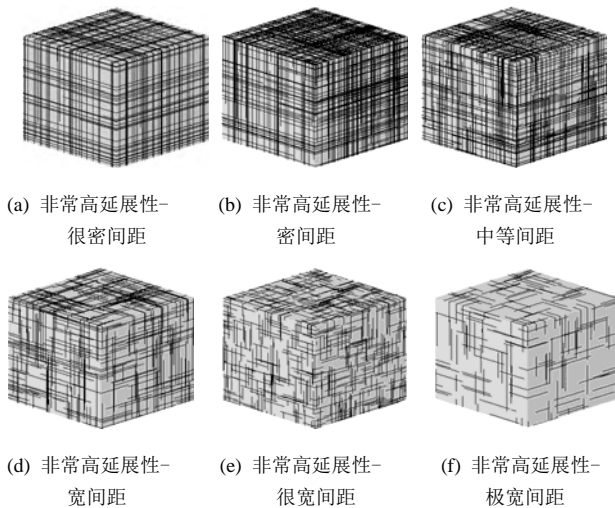


图7 岩体结构模型

Fig.7 Rock mass structural models

基于修正的块体化程度评价方法, 计算各岩体的块体体积百分比, 并利用表2对各岩体块体化程度进行分级, 结果如表4所示。

表4 各岩体模型的块体化程度及完整性

Table 4 The blockiness degree and integrity of rock mass

岩体模型	块体体积百分比/%	块体化程度	完整性等级
a	91.428 6	严重块状化	极破碎
b	61.256 7	块状化	破碎
c	27.523 1	中度块状化	较破碎
d	17.535 0	轻度块状化	较完整
e	10.500 2	轻度块状化	较完整
f	0.365 0	非块状化	完整

由岩土工程勘察规范、工程地质调查规范、水利水电工程地质勘查规范等可知, 结构面间距为 >1.00 m、 $0.40\sim 1.00$ m、 $0.20\sim 0.40$ m、 <0.20 m时, 对应的岩体完整性分别为完整、较完整、较破碎、破碎。将表4中利用块体化程度修正评价方法确立的岩体完整性等级与由规范划分的岩体完整性等级对比可知, 块体化程度修正评价方法可准确刻画岩体完整性, 与各类工程规范表征的岩体完整性结果基本一致。此外, 修正的块体化程度评价方法能够更准确量化和定位处于等级边界的岩体完整性。

因此, 本文建立的块体化程度修正评价方法是合理的, 能够准确表征岩体的块体化程度。

6 工程应用

6.1 实例验证1

广西铜坑矿锌多金属矿体+255 m中段与+305 m中段岩体完整性较好, 质量等级为II级, 围岩较坚

硬, 且强度较高。选取沿矿体倾向第1和第2条穿脉巷道之间, 长度约为100 m, 高度为中段高度(50 m), 沿走向长约为60 m的4#矿块为试验区, 开展岩体块体化程度评价的工程应用。试验区岩体单轴抗压强度约为80 MPa, RQD 为82%, 节理间距约为0.46 m, 节理连续, 且结构面表面光滑, 无填充物。

基于区域结构面调查数据, 利用General Block软件建立 $60\text{ m}\times 100\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的岩体三维结构模型, 识别岩体内的块体并计算块体体积百分比。经计算试验区岩体块体体积百分比为11.18%, 为轻度块状化等级岩体, 如图8所示。

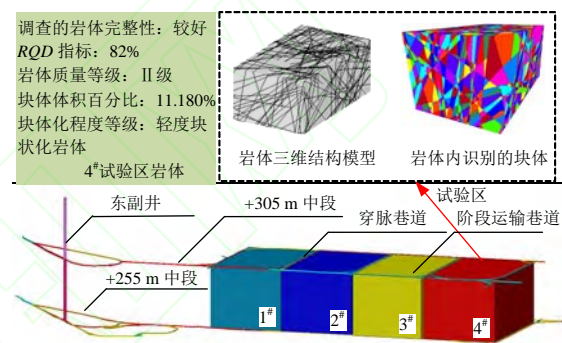


图8 试验区岩体块体化程度评价结果

Fig.8 The blockiness results of rock mass in Experimental zone

由图8可知, 利用修正的块体化程度评价方法刻划的岩体块体化程度符合实际情况, 能够从三维角度准确表征岩体完整性。

6.2 实例验证2

乌东德水电工程坝区结构面不发育且多短小, 主要为宽~很宽间距, 岩体完整性程度以较完整~完整为主。岩体结构以厚层状结构为主, 部分中厚层状、巨厚层状及少量薄层状结构。文献[12]对乌东德坝区地下厂房岩体结构面数据进行了详尽调查。由文献可知 PD49-1 平硐层面裂隙间距为6.0 m, PD4 支硐层面裂隙间距为7.4 m, 各平硐内的层面裂隙贯穿整个 $30\text{ m}\times 30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的计算模型。文献[12]利用现有块体化程度评价方法对坝区部分平硐岩体的块体化程度进行了计算, 并相应计算了三维块度模数, 结果分别如表5、6所示。

根据裂隙直径与间距比可知, PD49-1 平硐、PD4 支硐岩体切割不完全, 受裂隙切割后形成的块体体积均较大, 如图9所示。PD49-1 平硐块体总体积为 $17\ 376.2\text{ m}^3$, 体积小于 1 m^3 的块体有53个, 总体积为 $34.752\ 4\text{ m}^3$; 体积大于 1 m^3 的块体有7

个, 总体积为 $17\,341.447\,6\text{ m}^3$ 。PD4 支洞块体总体积为 $13\,793.3\text{ m}^3$, 体积小于 1 m^3 的块体有 21 个, 总体积为 $68.966\,5\text{ m}^3$; 体积大于 1 m^3 的块体有 4 个, 总体积为 $13\,724.333\,5\text{ m}^3$ 。通过块度模数计算出岩体完整性程度较好, 但依据现有块体化程度评价方法计算公式计算出 PD49-1 平洞、PD4 支洞分别为块状化岩体和中度块状化岩体, 显然与块度模数计算结果及岩体实际完整性程度不符。

表 5 岩体块体化程度表

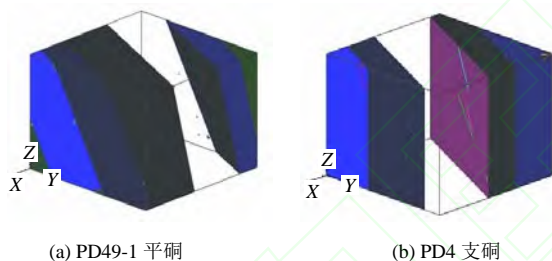
Table 5 The blockiness degree of rock mass

高程/m	平洞编号	块体体积百分比/%	块体化程度等级
+900	PD49-1	64.4	块状化岩体
+950	PD4 支洞	51.1	中度块状化岩体

表 6 岩体三维块度模数及完整性等级

Table 6 Three-dimensional block modulus and integrity levels of rock mass

高程/m	平洞编号	A_k	M_k	岩体分类
+900	PD49-1	1.0	5.0	完整
+950	PD4 支洞	0.9	4.5	完整

图 9 乌东德坝区拱座岩体内部的块体^[12]
Fig.9 The block in WuDongde Dam Area rock

利用块体化程度评价修正方法计算出 PD49-1 平洞、PD4 支洞的综合块体体积百分比分别为 12.847%、10.168%, 均属于轻度块状化岩体, 对应岩体完整性程度为较完整, 计算结果符合实际情况。

7 结 论

(1) 通过深入分析发现, 现有块体化程度评价方法因存在未充分考虑岩体切割程度及块体规模; 未限定岩体尺度、边界、块体类型、结构面类型等基础应用条件; 块体化程度等级划分不合理等缺陷, 使其不能准确表征岩体真实块体化程度。

(2) 基于岩体切割程度、三维块度模数、体积 RQD 等计算原理对现有块体化程度评价方法的各种缺陷进行了修正, 限定了块体体积百分比相关概念, 提出了考虑岩体完整性块度尺寸效应的块体体积综合百分比计算方法, 确立了块体化程度等级划

分及分级指标取值依据。

(3) 通过限定块体化程度评价方法应用基础条件, 确立块体化程度评价方法计算流程, 创建块体化程度分级标准, 建立了完善的块体化程度评价修正方法。选取 6 种岩体模型, 利用修正方法分别评价了其完整性, 并通过与各类《规范》对岩体完整性划分结果的对比, 分析了修正方法的合理性。

(4) 分别引用铜坑矿锌多金属矿体、乌东德水电工程的块体研究数据, 开展了修正块体化程度评价方法的实例验证。结果表明, 修正的块体化程度评价方法能够从三维角度准确反映真实岩体的完整程度, 具有较好的适用性。

参 考 文 献

- [1] 张敏思, 杨勇, 梁海安. 基于凹体凸化的全空间块体识别方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3698—3706.
ZHANG Min-si, YANG Yong, LIANG Hai-an. Spatial block identification method based on convex decomposition of concave polyhedron [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3698—3706.
- [2] DEERE D U. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 1963, 1(1): 18—22.
- [3] 中华人民共和国水利部. GB 50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB50218-94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1994.
- [4] 郭强, 葛修润, 车爱兰. 岩体完整性指数与弹性模量之间的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3914—3919.
GUO Qiang, GE Xiu-run, CHE Ai-lan. Research on relationship of rock mass integrity index and rock mass elastic modulus[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Supp. 2): 3914—3919.
- [5] 马超锋, 李晓, 成国文, 等. 工程岩体完整性评价的实用方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3993—4005.
MA Chao-feng, LI Xiao, CHENG Guo-wen. Study of practical approach to assess integrity of engineering rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(12): 3993—4005.
- [6] SENZ Z, KAZI A. Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &*

- Geomechanics Abstracts**, 1984, 21(4): 203—212.
- [7] 陈德基, 刘洪特. 岩体质量评价的新指标——块度模数[C]//全国首届工程地质学术会议论文选集. 苏州: [出版者不祥], 1979.
CHEN De-ji, LIU Hong-te. The new indication of rock mass quality evaluation—module of lumpiness[C]//The First Selection of Engineering Geological Academic Conference Papers. Suzhou: [s. n.], 1979.
- [8] 张奇华, 边智华, 余美万. 采用全空间块体搜索技术初步研究岩体完整性[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 507—515
ZHANG Qi-hua, BIAN Zhi-hua, YU Mei-wan. Preliminary research on rockmass integrity using spatial block identification technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 507—515.
- [9] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1326—1330.
WANG Chuan-ying, HU Pei-liang, SUN Wei-chun. Method for evaluating rock mass integrity based on borehole camera technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1326—1330.
- [10] 刘晓非. 裂隙岩体块体化程度研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
LIU Xiao-fei. Studies on blockiness of fractured rock mass[D]. Beijing, China University of Geosciences, 2010.
- [11] XIA Lu, LI Mao-hua, CHEN You-hua, et al. Blockiness level of rock mass around underground powerhouse of Three Gorges project[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 48(2): 67—76.
- [12] 王晓明. 乌东德坝区岩体裂隙及块体研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
WANG Xiao-ming. Study on rock fractures and rock blocks in Wudongde dam area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [13] 陈庆发, 韦才寿, 牛文静, 等. 一种基于块体化程度理论的裂隙岩体巷道顶板稳定性分级方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2901—290.
CHEN Qing-fa, WEI Cai-shou, NIU Wen-jing, et al. Stability classification of roadway roof in fractured rock mass based on blockiness theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 2901—2907.
- [14] 郭亮, 李晓昭, 周扬一, 等. 数字化结构面三维随机网络模拟及其有效性检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2854—2861.
GUO Liang, LI Xiao-zhao, ZHOU Yang-yi, et al. Simulation of random 3D discontinuities network based on digitalization and its validation test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp. 1): 2854—2861.
- [15] 阮云凯, 陈剑平, 李严严, 等. 基于裂隙产状和迹长划分岩体统计均质区研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2028—2032.
RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, LI Yan-yan, et al. Identification of homogeneous structural domains of jointed rock masses based on joint occurrence and trace length[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2028—2032.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京中国建筑工业出版社, 2009.
- [17] 刘新根, 朱合华, 刘学增, 等. 三维块体接触检索算法改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 489—497.
LIU Xin-gen, ZHU He-hua, LIU Xue-zeng, et al. Improvement of contact detection algorithm of three-dimensional blocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(3): 489—497.
- [18] 徐伟, 胡新丽, 黄磊, 等. 结构面三维网络模拟计算 RQD 及精度对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 822—833.
XU Wei, HU Xin-li, HUANG Lei, et al. Research on RQD of rock mass calculated by three-dimensional discontinuity network simulation method and its accuracy comparison[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 822—833.
- [19] 杜时贵, 王思敬. 岩石质量指标(RED)的各向异性分析[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 48—54.
DU Shi-gui, WANG Si-jing. Simple analysis of anisotropy of rock quality designation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(4): 48—54.