

基于数字摄影测量的结构面信息表征及应用研究

葛丽娜^{*1}, 易富¹, 王涛²

(1. 辽宁工程技术大学 建筑与交通学院, 阜新 123000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 结构面的存在直接影响岩体的强度、变形特征及破坏机制。为探究夏甸金矿矿区结构面的存在对岩体力学参数和岩体质量情况的影响, 利用数字摄影测量技术快速获取研究区域结构面几何信息, 并通过三维建模、激光扫描技术以及 VR-Platform 虚拟现实平台实现了结构面二维几何信息的真三维表征。基于此, 利用广义 Hoek-Brown 强度准则分析计算了各研究区域的岩体力学参数, 并根据岩体基本质量指标 BQ 值进行了岩体质量分级评价。结果表明, 夏甸金矿岩体力学参数指标和岩体质量指标均较好; 矿体下盘距离矿体方向越远, 岩体完整性系数和岩体力学参数越低; 利用广义 Hoek-Brown 强度准则计算所得岩体力学参数除内摩擦角外数值均与前期试验所得数据基本一致, 计算所得岩体内摩擦角度偏大的原因, 可能是其未考虑结构面自身的颗粒直径和形态等对岩体内摩擦角的影响。

关键词: 摄影测量; 结构面表征; 广义 Hoek-Brown 强度准则; 岩体质量分级

中图分类号: TU452; O346

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2020)05-0616-07

1 引言

岩体的损伤和破坏总是沿着力学性质相对薄弱的结构面发生和发展, 即最薄弱环节原理。结构面的存在直接影响岩体的强度、变形特征及破坏机制, 使岩体强度远小于岩石强度^[1]。岩体强度的计算及参数确定是开展岩体工程支护、稳定性评价及数值模拟工作的前提, 合理的岩体质量分级是选择工程结构参数和评价经济效益的依据之一^[2-3]。

在目前已有的结构面信息获取方法中, 钻探法^[4]对孔壁质量要求高, 只能反映钻孔周边结构面信息, 并且解译精度较差; 罗盘接触测量法存在费时、低效和劳动强度大等缺点; 三维激光扫描法因设备价格昂贵和对视线通视要求高等因素, 在很多工程应用中受到限制; 而数字摄影测量技术^[5]因获取结构面信息具有全面、快速和高精度的特点, 在地质工程领域的应用越来越广泛。Leu 等^[6]采用数字摄影测量技术构建了空间实体, 根据开挖空间和结构面方位鉴定危岩体。结构面的存在导致岩体具有高度的各向异性。冒海军等^[7]利用单弱面理论建立了岩体强度与结构面方位的一维和三维变化规律。Tse 等^[8]进行了岩石节理粗糙度表征研

究, 建立了二维节理轮廓线平均坡度均方根和结构函数与节理粗糙度系数 JRC 的函数关系。尹立明等^[9]通过数值模拟和理论分析相结合, 研究了双结构面的存在对岩体强度的影响。Fardin 等^[10]应用分形维数描述了结构面的粗糙度, 并讨论了结构面粗糙度的尺寸效应。国内外学者已提出多种方法用于岩体分级, 如 RMR 分类法、Q 分类法和 BQ 分级法。Dong 等^[11]根据岩体结构特征和碎裂程度的分类方法, 提出了一种碎裂结构岩体分类方法。周志东等^[12]利用上述三种方法对西南某水电坝肩体质量分级, 所得结果具有良好相关性。Aydin 等^[13]提出了一种新的岩体质量评价方法 RMQR, 可用于评价岩体的地质力学性质。祁生文等^[14]基于模糊数学对隧道围岩进行岩体质量分级, 预测结果与施工实际相吻合。Chen 等^[15]提出了岩体质量区域分级的思想, 并给出了相应的分级步骤, 建立了三维节点网络模型。宫凤强等^[16]将距离判别法用于岩体质量分级, 建立的距离判别分析模型精度高且误判率低, 可在工程中推广应用。

夏甸金矿采用上向进路尾砂充填采矿法, 当相邻采场采高大于 6 m 时, 滞后采场回采时间柱会发生劈裂和崩落现象。为探究这一工程现象的原因, 且考虑到井下作业光线和通视条件较差, 本文首先采用数字摄影测量技术快速获取结构面信息, 然后开展岩体强度参数计算和岩体质量分级研究, 研究结果为现场回采方案优化和施工提供理论支

收稿日期: 2019-09-23; 修改稿收到日期: 2019-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金(51774163)资助项目.

作者简介: 葛丽娜^{*} (1989-), 女, 博士生, 讲师

(E-mail: gln8223@163.com).

撑。

2 工程概况

夏甸金矿矿体位于芝下-姜家窑断裂带中,区内岩浆岩广泛发育,以花岗岩为主。岩石整体强度较好,局部地段受断层和构造的影响岩体较破碎。夏甸金矿-350水平以上采用废石充填法,-350水平以下529勘探线与547勘探线之间采用无底柱崩落采矿法,两侧采用上向进路充填采矿法,两者之间留设100 m矿柱。充填采矿法回采时采用隔一采一的方式,现场生产时常遇到当相邻采场采高大于6 m,滞后采场回采时,间柱会发生劈裂和崩落现象,进入深部开采后,地压不断增大,地灾现象将会更加频繁和恶化。

3 结构面信息快速采集

结构面信息是岩体物理力学性质的主要影响因素,通过现场实测获取结构面的几何特征信息,是进行岩体力学参数计算和岩体质量评价的基础^[17]。

3.1 ShapeMetriX 3D 系统

ShapeMetriX 3D 系统是一种可快速获取结构面信息的三维不接触测量系统,目前广泛应用于边坡^[18]等工程的岩体结构面获取,具有简捷、快速和高精度等优点。ShapeMetriX 3D 系统的主要原理是利用三维视觉技术和数字图像相关技术^[19],通过三维影像的计算方法获取待测区域的空间形态,如图1所示。

工作程序如下,现场摄像获取待测区域的左右视图,根据标定的参考点在系统软件中合成测量区域的三维图像,通过测量点与待测区域的距离值标定三维图像的尺寸和角度参数,得到与实际情况相符的岩体三维图像。

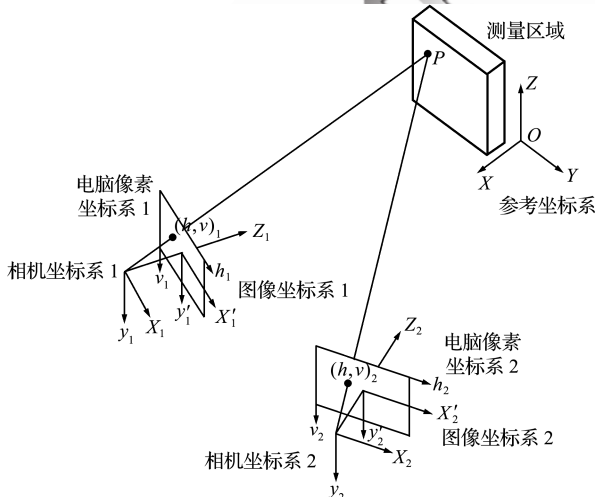


图1 三维视觉技术原理

Fig. 1 Schematic of stereo imaging setup

3.2 结构面信息实测分析

根据现场实际情况,选取代表性地段,分别对中段运输大巷、联络巷和回采进路的岩体结构面进行信息采集,其中运输大巷5个测点、联络巷6个测点、回采进路7个测点,各测点现场信息采集及室内数据分析计算方法步骤一致,以回采进路13#测点为例进行详细说明。通过像素点匹配和图像变形偏差纠正等技术获取真实的岩体三维图像,通过结构面迹长、倾向和倾角等表征结构面信息。通过ShapeMetriX 3D系统识别,得出测点13的主要节理分组,如图2所示。可以看出,测点13共有三组节理,分别导出三组节理测线信息。其中,第一组节理包含33条测线,第二组节理包含21条测线,第三组节理包含27条测线,统计出各测线迹长、倾向和倾角等信息,分析计算得出各组节理的线密度,列入表1。

根据统计岩体力学^[20]所提方法,计算可得测点13的结构面体密度值,列入表1。根据各节理特征信息,绘制节理参数的等密度直方图,分析等密度直方图的分布形态,并对其进行概率分布拟合,列入表2,得出测点13的优势结构面产状为 $135.78^\circ/76.76^\circ$, $147.27^\circ/42.58^\circ$, $293.94^\circ/68.26^\circ$ ($135.78^\circ/76.76^\circ$ 为结构面产状的方位角表示方法,其中 135.78° 为结构面倾向, 76.76° 为结构面的倾角)。

3.3 结构面真三维表征

将矿山生产过程中涉及的地质信息、结构面数据和岩体力学参数等大量的二维数据集成为动态

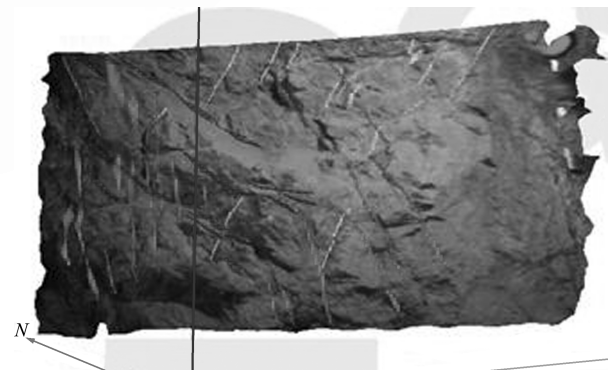


图2 测点13的节理分组识别结果
Fig. 2 Recognition result of 13 joint group

表1 结构面参数

Tab. 1 Structural surface parameters

组号	数量/条	线密度/条·m ⁻¹	体密度/条·m ⁻³
1	33	1.4918	
2	21	2.2864	5.6067
3	27	1.8285	

表 2 结构面几何信息
Tab. 2 Geometric information of structure surface

组别	结构面几何参数特征值								
	迹长/m			倾向/(°)			倾角/(°)		
	分布率	均值	标准差	分布率	均值	标准差	分布率	均值	标准差
1	正态	0.897	0.26	正态	135.78	56.45 ²	指数	76.76	10.11
2	负指数	0.679	0.27	正态	147.25	28.73 ²	正态	42.57	12.71
3	正态	0.476	0.127	指数	293.94	10.93 ²	指数	68.24	5.95

可视化的三维模型,实现二维数据的真三维表征是数字化矿山建设的基础。本文通过 ShapeMetriX 3D 系统获取的结构面二维数据信息,利用 3Dsmax 软件建立结构面的三维模型,通过特征点标定将结构面模型嵌入到激光扫描所得的巷道实体模型中,实现二维结构面信息的真三维表征(图 3),为数字化矿山的实现提供思路。

4 岩体力学参数计算

4.1 点荷载试验

点荷载试验因其简单经济而广泛应用于岩土工程领域,利用点荷载试验仪可进行现场试验以获取岩石的力学强度参数。一般现场选取相同岩性不同尺寸的岩块,进行加载压裂。工程中一般考虑加载间距为 50 的点荷载强度,计算公式如下^[2],

$$I_{S(50)} = (D_E/50)^m I_D \quad (1)$$

式中 $I_{S(50)}$ 为修正后的点荷载强度, m 为修正指数,一般取 0.45。

根据《工程岩体分级标准》,岩石的单轴饱和抗压强度 R_c 可由测得的点荷载强度 $I_{S(50)}$ 计算求得,

$$R_c = 22.82 I_{S(50)}^{0.75} \quad (2)$$

通过现场点荷载试验,计算可得研究区域岩石单轴饱和抗压强度,其中回采进路为 71.25 MPa,联络巷为 63.75 MPa,中段运输巷为 56.25 MPa。计算结果表明,研究区域整体抗压强度较好,回采进路岩石抗压强度最好,中段运输巷道岩石抗压强度最差,联络巷岩石抗压强度处于两者中间,即在矿体下盘,远离矿体的方向,岩石抗压强度呈减小趋势。



图 3 结构面信息的真三维表征

Fig. 3 Real three dimensional characterization of structural plane

4.2 广义 Hoek-Brown 强度准则

广义 Hoek-Brown 强度准则是在 Hoek-Brown 强度准则的基础上,考虑岩石的完整性,对其进行进一步完善得出的,广义的 Hoek-Brown 强度准则^[21]公式如下,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^\alpha \quad (3)$$

式中 σ_1 和 σ_3 为岩体的最大和最小主应力, σ_{ci} 为岩石的单轴抗压强度, m_b 为完整岩石岩性系数 m_i 的消减值,具体取值由式(4)确定, s 和 α 为与岩体特性有关的材料常数,取值在 0~1 之间,对完整岩石 $s = 1$, s 和 α 的取值由式(5,6)确定。

$$m_b = m_i \exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)] \quad (4)$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (6)$$

式中 D 为岩体扰动衡量因子, GSI 为表征岩体镶嵌结构和完整性的指标。

岩体的弹性模量可由式(7)求得。

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{(GSI-10)/40} \quad (7)$$

常用数值模拟软件大都采用 Mohr-Coulomb 准则,有必要给出岩体粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ 值,两者计算公式为

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6 \alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha) + 6 \alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad (8)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2\alpha)s + (1-\alpha)m_b \sigma_{3n}](s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha) \sqrt{1 + \frac{6 \alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha)}}} \quad (9)$$

$$\text{式中} \quad \sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_{ci} \quad (10)$$

其中 $\sigma_{3\max}$ 为 Mohr-Coulomb 准则与 Hoek-Brown 准则关系限制应力的上限值,计算如下,

$$\sigma_{3\max} / \sigma_{cm} = 0.47 [\sigma_{cm} / (\gamma H)]^{-0.94} \quad (11)$$

式中 σ_{cm} 为岩体强度值, H 为巷道埋深, γ 为岩体容重。

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{[m_b + 4s - \alpha(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha)} \quad (12)$$

4.3 岩体力学参数计算

根据现场获取的结构面信息,结合点荷载试验所得岩石单轴抗压强度,利用广义 Hoek-Brown 强度准则计算岩体力学参数时需要确定 4 个指标。

(1) 根据 3.1 节点荷载试验所得的岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 。

(2) 完整岩石岩性系数 m_i , 可根据岩石类型所决定的 Hoek-Brown 常量表查得^[22]。本次计算过程中 Hoek-Brown 常数 m_i 回采进路的黄铁绢英岩取值为 30, 联络巷和运输大巷的花岗质碎裂岩取值为 33。

(3) 岩体的地质强度指标 GSI 由图 4 确定。GSI 是 Hoek 提出的围岩分类系统与岩体强度参数的数学联系,用于定量评价岩体的力学强度。GSI 基于岩体结构控制论提出,可以反映岩体的物质组成、构造特征和地质历史等基本地质要素,由岩体块度和结构面状态特征所决定,其中岩体块度反映了岩体的地质历史,结构面状态则反映主要地质约束条件。GSI 方法根据岩体的构造特征和地质历史,将岩体结构分为块状、非常块状、块状/褶曲和碎块状 4 种结构状态;根据结构面的风化状态、粗糙程度和充填物情况等将结构面分为 5 种状态。

图 4 的岩体体积节理数根据式(13)求得,其中回采进路 $J_v=4.76$, 联络巷 $J_v=6.29$, 中段运输巷 $J_v=7.56$ 。

$$J_v = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_n}{L_n} \quad (13)$$

式中 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 为垂直于结构面的测线长度; $N_1, N_2, \dots, N_n$ 为同组结构面的数目。L 和 N 的值根据 ShapeMetriX 3D 系统实测结构面信息得到。

表面条件	非常好的 非常粗糙的新的 无风化的表面	好的 粗糙的轻微风化的 暗铁色的表面	比较好的 光滑的中等风化的表面	差的 有擦痕面高度风化的 具有密实或角状块状充填覆盖的表面	非常差的 有擦痕面具有粘土质的软岩覆盖或充填的高度风化的表面
岩体结构					
块状 由 3 个正交的不连续面形成的相互连接很好的未扰动的立方块岩体 $J_v \leq 3$	$J_v=1$ 80 $J_v=2$				
非常块状 由 4 个或更多不连续面形成的具有多面角状部分扰动相互连接的块状岩体 $3 < J_v \leq 10$	$J_v=3$ 70 $J_v=4$ $J_v=5$ $J_v=6$ $J_v=7$ 60 $J_v=8$ $J_v=9$ $J_v=10$				
块状/褶曲 由许多相互交错的不连续面形成的具有角状块体的褶曲和(或)断层 $10 < J_v \leq 30$	$J_v=14$ $J_v=18$ $J_v=22$ $J_v=26$ $J_v=30$		40	30	
碎块状 具有角状或圆形岩块的非常破碎的相互连接差的岩体 $J_v > 30$					20 10

图 4 地质强度指标 GSI

Fig. 4 Geological strength index GSI

(4) 岩体扰动系数 $D=0.7$, 由矿山实际爆破情况确定。

根据上述确定的 4 个指标,利用式(4~12)计算岩体力学参数,结果列入表 3。计算结果表明,岩体各力学参数的变化规律与岩石单轴抗压强度一致,即在矿体下盘,远离矿体的方向力学参数逐渐降低。由表 3 可知,考虑结构面几何信息,利用广义 Hoek-Brown 强度准则计算所得的岩体力学参数中,内摩擦角度值偏大。查阅文献^[23]可知,夏甸金矿矿体内摩擦角约为 33° , 岩体内摩擦角约为 28° , 表 3 数据中矿体内摩擦角为 40.9° , 岩体内摩擦角均值为 38° , 分别偏大了 23.9% 和 35.7%。这可能是由于广义 Hoek-Brown 强度准则没有充分考虑结构面充填材料性质引起的,因为结构面材料的颗粒大小和分布形态的不同均会造成岩体内摩擦角度的变化。

5 矿岩体质量分级

5.1 BQ 分级方法

鉴于岩体的非均质各向异性,以及人类活动与岩体介质的相关性,采用岩体基本质量指标 BQ 的工程岩体分级一直是岩土工程应用中的最基本内容。

岩体基本质量指标 BQ 是由多参数组成的综合指标评价方法,以 R_c 和 K_v 两个分级因素为定量指标参数^[24],按式(14)计算岩体基本质量指标 BQ 值。

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (14)$$

式中 K_v 为岩体的完整性系数,可根据第 4 节统计的结构面几何信息求得。

BQ 值求得后需要对其进行进一步修正,主要考虑天然应力、地下水和软弱结构面等的影响。根据修正后的 BQ 值,按照岩体质量分级标准(表 4)对研究区域进行分级工作。

5.2 岩体质量分级

根据修正后的岩体基本质量 BQ 值,参照表 4 的分级标准,对研究区域岩体质量情况进行分级评价,结果列入表 5。

表 3 岩体力学参数计算

Tab. 3 Calculation of mechanical parameters of rock mass

研究区域	岩体单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E/GPa	粘聚力 c/MPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
回采进路	21.137	14.306	4.321	40.9
联络巷	17.153	11.207	3.849	39
中段运输巷	14.651	9.065	3.609	37

表 4 岩体质量分级标准

Tab. 4 Classification standard of rock mass quality

基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体的基本质量指标 BQ
I	岩石极坚硬,岩体完整	>550
II	岩石极坚硬~坚硬,岩体较完整;岩石较坚硬,岩体完整。	550~450
III	岩石极坚硬~坚硬,岩体较破碎;岩石较坚硬或软硬互层,岩体较完整;岩石为较软岩,岩体完整。	450~350
IV	岩石极坚硬~坚硬,岩体破碎;岩石较坚硬,岩体较破碎~破碎;岩石较软或软硬互层软岩为主,岩体较完整~较破碎;岩石为软岩,岩体完整~较完整。	350~250
V	较软岩,岩体破碎;软岩,岩体较破碎或破碎;全部极软岩及全部极破碎岩。	<250

表 5 岩体质量分级结果

Tab. 5 Quality classification results of rock mass

研究区域	岩体完整性系数 K_v	BQ 值	岩体质量等级
回采进路	0.7	478.5	II
联络巷	0.66	445.3	III
中段运输巷	0.62	414.2	III

由表 5 可知,回采进路岩体质量为 II 级,岩体硬度和完整性好,联络巷和中段运输巷岩体质量为 III 级,岩体完整性较回采进路差。根据计算所得的 BQ 值可以发现,矿体下盘远离矿体方向,岩体 BQ 值逐渐减小,由此可知,研究区域的岩体力学参数主要受控于岩体完整性,矿体下盘远离矿体方向岩体完整性逐渐变差,导致岩体力学参数逐渐降低。

6 结 论

(1) 基于数字摄影测量技术可快速获取结构面几何数据信息,结合三维建模和激光扫描技术实现结构面二维数据的真三维重构,该思路为数字化矿山建设提供借鉴。

(2) 研究区域位于矿体下盘,距离矿体越远,岩体完整性系数值、BQ 指标值和岩体力学参数值均逐渐减小。

(3) 利用广义 Hoek-Brown 强度准则计算所得岩体力学参数除内摩擦角外数值均与前期试验所得数据基本一致,验证了本文方法计算岩体强度参数的可靠性。

(4) 广义 Hoek-Brown 强度准则计算的岩体内摩擦角度偏大的原因可能是其未考虑结构面自身的颗粒直径和形态等的影响。

参考文献(References):

[1] 贾 蓬,唐春安,杨天鸿,等.具有不同倾角层状结构面岩体中隧道稳定性数值分析[J].东北大学学报(自然科学版),2006,27(11):1275-1278. (JIA Peng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Numerical

stability analysis of surrounding rock mass layered by structural planes with different obliquities [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006,27(11):1275-1278. (in Chinese))

- [2] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2013. (CAI Mei-feng. *Rock Mechanics and Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [3] Wu L Z, Li S H, Zhang M, et al. A new method for classifying rock mass quality based on MCS and TOPSIS [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(6):199.
- [4] 王川颖, LAW K T. 钻孔摄像技术的发展与现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3440-3448. (WANG Chuan-ying, LAW K T. Review of borehole camera technology [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3440-3448. (in Chinese))
- [5] 杨天鸿,于庆磊,陈仕阔,等.范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2482-2489. (YANG Tian-hong, YU Qing-lei, CHEN Shi-kuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fanggezhuang coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12):2482-2489. (in Chinese))
- [6] Leu S S, Chang S L. Digital image processing based approach for tunnel excavation faces [J]. *Automation in Construction*, 2005, 14(6):750-765.
- [7] 冒海军,杨春和.结构面对板岩力学特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3651-3656. (MAO Hai-jun, YANG Chun-he. Study on effects of discontinuities on mechanical characters of slate [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20):3651-3656. (in Chinese))
- [8] Tse R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficients [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5):303-307.

- [9] 尹立明,张培森.双结构面对岩体强度影响的模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):600-603. (YIN Li-ming, ZHANG Pei-sen. Simulation analysis of rock mass strength affected by dual structural plane[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4):600-603. (in Chinese))
- [10] Fardin N, Feng Q, Stephansson O. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2):329-335.
- [11] Dong S, Yi X Y, Feng W K. Quantitative evaluation and classification method of the cataclastic texture rock mass based on the structural plane network simulation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(6):1767-1780.
- [12] 周志东,胡卸文,张俾元,等.西南某水电站坝肩岩体质量分级方法选取探讨[J].成都理工学院学报,1999,26(1):82-85. (ZHOU Zhi-dong, HU Xie-wen, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Discussion on the selection of rockmass quality classification of a hydroelectric power station abutments [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1999, 26(1):82-85. (in Chinese))
- [13] Aydan Ö, Ulusay R, Tokashiki N. A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geo-mechanical characteristics of rock masses [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4):1255-1276.
- [14] 祁生文,伍法权.基于模糊数学的TBM施工岩体质量分级研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1225-1229. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Surrounding rockmass quality classification of tunnel cut by TBM with fuzzy mathematics method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6):1225-1229. (in Chinese))
- [15] Chen Q F, Yin T C. Integration of homogeneous structural region identification and rock mass quality classification [J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(1):181353.
- [16] 官凤强,李夕兵.距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):190-194. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Application of distance discriminant analysis method to classification of engineering quality of rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1):190-194. (in Chinese))
- [17] 李地元,朱泉企,李夕兵.孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(1):58-66. (LI Di-yuan, ZHU Quan-qi, LI Xi-bing. Research on the effect of cavity shapes for the progressive failure and mechanical behavior of marble [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(1):58-66. (in Chinese))
- [18] 孙广明,胡高建,肖平,等.抚顺西露天矿边坡岩体强度计算及质量分级研究[J].煤炭科学技术,2017,45(12):36-42. (SUN Guang-ming, HU Gao-jian, XIAO Ping, et al. Study on strength calculation and quality grading of slope rock in Fushun West Open Pit Mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(12):36-42. (in Chinese))
- [19] 马永尚,陈卫忠,杨典森,等.基于三维数字图像相关技术的脆性岩石破坏试验研究[J].岩土力学,2017,38(1):117-123. (MA Yong-shang, CHEN Wei-zhong, YANG Dian-sen, et al. Experimental study of brittle rock failure based on three-dimensional digital image correlation technique [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1):117-123. (in Chinese))
- [20] 贾洪彪,唐辉明,刘佑荣,等.岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用[M].北京:科学出版社,2008. (JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, LIU You-rong, et al. *Theory and Engineering Application of 3D Network Modeling of Discontinuities in Rockmass* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [21] Hoek E, Brown E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(3):445-463.
- [22] 盛佳,李向东.基于Hoek-Brown强度准则的岩体力学参数确定方法[J].采矿技术,2009,9(2):12-14, 41. (SHENG Jia, LI Xiang-dong. Method for determining parameters of rock mechanics based on Hoek-Brown strength criterion [J]. *Mining Technology*, 2009, 9(2):12-14, 41. (in Chinese))
- [23] 薛一鸣.夏甸金矿大跨度采场稳定性数值分析与报警阈值研究[D].北京科技大学,2010. (XUE Yi-ming. Stability Analysis on Xiadian Gold Mine Stope and Study on the Alarm Threshold [D]. Beijing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [24] 郭爱清,汪斌.基于岩体质量指标BQ的岩质边坡工程岩体分级方法[J].岩石力学与工程学报,2014,33(4):699-706. (GUO Ai-qing, WANG Bin. Engineering rock mass classification method based on rock mass quality index BQ for rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(4):699-706. (in Chinese))

Structural plane information characterization and application based on digital photogrammetry

GE Li-na^{*1}, YI Fu¹, WANG Tao²

(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

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

Abstract: The existence of the structural plane directly affects the strength, deformation characteristics and failure mechanism of a rock mass. In order to explore the influence of the structural plane on the mechanical parameters of rock mass and the quality of a rock mass of the Xia Dian gold mine, the digital photogrammetry technology was used to quickly acquire the geometric information of the structural plane of the study area, and the true three-dimensional characterization of the two-dimensional geometric information of the structural plane was realized by three-dimensional modeling, laser scanning technology and VR-Platform virtual reality platform. Based on this information, the generalized Hoek-Brown strength criterion was used to analyze mechanical parameters of each studied area of the rock mass, and the rock mass quality classification was evaluated according to the BQ value of the basic quality index of the rock mass. The values of the mechanical parameters of the rock mass calculated by the generalized Hoek-Brown strength criterion are basically consistent with the data obtained in the previous test except the internal friction angle. The reason why the calculated friction angle of the rock is too large may be that it does not consider the influence of the particle diameter and shape of the structural plane itself on the friction angle of the rock.

Key words: digital photogrammetry; structural plane characterization; generalized Hoek-Brown strength criterion; rock mass quality classification

引用本文/Cite this paper:

葛丽娜, 易 富, 王 涛. 基于数字摄影测量的结构面信息表征及应用研究[J]. 计算力学学报, 2020, 37(5): 616-622.

GE Li-na, YI Fu, WANG Tao. Structural plane information characterization and application based on digital photogrammetry [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(5): 616-622.