

DOI: 10.11779/CJGE201410021

露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法及工程应用

师文豪^{1, 2}, 杨天鸿^{1, 2*}, 王培涛^{1, 2}, 胡高建^{1, 2}, 朱新平³, 肖平⁴

(1. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110819;

3. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 4. 抚顺矿业集团西露天矿, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 露天矿边坡岩体通常含有大量 IV、V 级结构面, 影响岩体稳定性。针对这种岩体特性, 提出了系统的工程分析方法: 首先, 应用 3GSM 非接触测量系统对岩体出露结构面现场测试, 统计结构面几何参数概率模型; 进一步根据 Monte Carlo 方法生成裂隙网络, 分别利用离散介质渗流方法和几何损伤理论, 在分析 REV 尺寸效应基础上, 计算岩体渗透张量和弹性张量, 实现岩体参数表征; 最后, 基于等效连续介质模型, 建立各向异性岩体渗流应力耦合模型, 采用 COMSOL 有限元软件分析边坡岩体稳定性。应用该方法对抚顺西露天矿南帮进行了实例分析, 计算结果与实际吻合较好。提出的露天矿边坡岩体稳定性分析方法能够考虑节理分布导致的岩体各向异性特征, 简单合理, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 节理岩体; 边坡稳定性; 各向异性; 渗流应力耦合; 数值分析

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1924-10

作者简介: 师文豪(1988-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: shiwenhaoneu@126.com。

Anisotropy analysis method for stability of open-pit slope rock mass and its application

SHI Wen-hao^{1, 2}, YANG Tian-hong^{1, 2}, WANG Pei-tao^{1, 2}, HU Gao-jian^{1, 2}, ZHU Xin-ping³, XIAO Ping⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. China Coal Technology and

Engineering Group Shenyang Institute, Fushun, 113122, China; 4. West Open-pit Mine of Fushun Mining Group, Fushun 113001, China)

Abstract: A lot of grade IV and V discontinuities distributed in the open-pit slope rock mass have great effect on the stability of rock mass. According to the characteristics of open-pit slope rock mass, a systematic analysis method is put forward. Firstly, a 3GSM contact-free measuring system is employed to capture the discontinuities outcropped in rock mass, and the probability model for geometric parameters of structural plane can be obtained. Then the fracture network is generated by means of the Monte Carlo method. Considering the size effects of REV, the permeability tensor of rock mass is calculated using the discrete medium seepage method, and the elasticity tensor of rock mass is obtained using the geometrical damage theory, and the rock mass parameters are finally determined. Finally, the anisotropic seepage-stress coupling model based on the equivalent continuum model is established for mechanical analysis of stability of slope rock mass by using COMSOL software. Moreover, the proposed method is applied in the southern slope of Fushun west open-pit mine, and the results agree with the failure observation well. The stability of slope rock mass can be evaluated by using the proposed method considering the characteristics of rock mass caused by distribution of joints. It is simple but very reasonable, and hence it has a good application prospect.

Key words: jointed rock mass; slope stability; anisotropy; seepage-stress coupling; numerical analysis

0 引 言

露天矿边坡岩体大都是由结构面纵横切割且具有一定结构的多裂隙体, 在结构面五级分类中^[1], IV级和V级结构面尺度较小, 数目众多, 在边坡工程中非常普遍, 是岩体力学性质、结构效应的基础, 其分布

形态不仅导致岩体的非均匀性和各向异性, 而且影响

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174045); 国家自然科学基金重点项目(51034001)

收稿日期: 2013-12-19

*通讯作者

岩体的失稳模式^[2]。如何考虑露天采矿揭露的海量结构面信息, 进行岩体参数表征, 并建立工程适用的力学模型, 实现结构面测试、岩石力学实验等数据与岩体稳定性分析的有机衔接, 一直是岩石力学与工程需要解决的难点和热点问题。该问题的解决可为岩体稳定性分析、施工设计提供科学、有效的解决途径, 对于促进岩体力学分析方法与工程实践的紧密结合, 具有重要的理论和实际意义。

国内外学者们对岩体力学特性做了大量的研究工作^[3-13], 根据研究尺度不同可归纳为细观方法和宏观方法。细观方法大都是围绕节理数少且规则的岩石试样, 主要从断裂力学理论^[3], 物理试验^[4]和数值模拟试验^[5-6]等角度展开, 在深入认识岩体细观结构, 微裂纹萌生、扩展、贯通直至岩体破裂的整个物理过程具有优越性。然而露天矿边坡具有大规模工程特性, 相比细观方法, 宏观研究更具有实际意义。目前, 宏观方法主要有岩体质量分级经验法和理论力学模型法, 其中岩体质量分级经验法如 GSI 系统^[7], BQ 法^[8]等将结构面纳入参评因素, 根据不同的经验公式建立不同岩体评价体系, 快速给出岩体质量评价结果, 节省了时间和投资, 但是难以对岩体应力状态、稳定性系数等力学指标进行量化, 适用于岩体工程的初期勘察设计。而理论力学模型法旨在建立合适的岩体力学模型研究岩体的宏观变形、破坏等力学特征。对于岩体含有区域性大断裂、或各种断层等大规模实测结构面, 可将其作为独立的力学介质单元, 赋予合适的参数进行岩体力学分析。对于块状岩体, 结构面相互交切形成的整体或局部块体滑落表现出不连续介质、大变形力学行为, 石根华博士基于块体理论提出了非连续变形分析方法 (DDA), 得到了国际认可, 在实际工程中取得了较好的应用, 并普遍推广^[9-10]; 然而对于含有细观尺度非常大, 工程尺度非常小的 IV 级和 V 级结构面岩体, 大量结构面切割导致岩体呈碎裂结构, 工程尺度上完全考虑每个结构面的影响缺乏实际意义, 孙广忠对连续介质岩体进行过细致深入的研究^[11], 薛守义对岩体连续介质模型的概念, 模型的使用条件, 以及连续介质岩体力学模型在工程分析中的几个问题进行了较为细致的论述^[12]。亦有研究指出, 对于岩体稳定渗流, 一般来讲岩体渗流样本 REV 存在且为工程结构体最大尺寸的 1/50~1/20 时应尽量采用等效连续介质模型^[13], 但是应用连续介质模型建立岩体跨尺度结构特征与介质力学属性之间的本质联系还存在以下问题: ①严谨的力学模型和岩体复杂结构面粗略测试方法脱节。Neuman 认为: 虽然岩体结构面参数的统计方法及网络模拟极具潜力, 但依靠传统测量法采集

的有限数据来表征现场岩体海量节理分布规律, 显然不够全面系统^[14]。②岩体存在各向异性, 其张量参数是否存在表征单元体 (REV) 尺寸效应, 以及表征单元体如何得到存在争议, 导致各向异性岩体理论模型缺乏实例验证。

因此本文依托抚顺西露天矿南帮边坡工程实例, 根据露天矿开挖导致岩体大量结构面揭露这一优越的客观条件, 首先, 借助先进的岩体结构面测试系统 (3GSM 系统), 获取翔实的结构面测试数据并进行概型统计; 然后, 应用 Monte Carlo 方法将节理移植, 生成裂隙网络模型, 从性质上将“不确定性的随机模型”转化为“确定性模型”, 分别采用离散介质模型和几何损伤理论, 考虑岩体 REV 尺寸效应, 对岩体各向异性渗透和变形参数进行表征; 最后建立各向异性岩体渗流应力耦合模型, 采用基于张拉-剪切复合屈服准则的强度折减法, 应用 COMSOL 有限元软件研究边坡岩体稳定性, 为露天矿边坡岩体稳定性分析提供科学的研究方法。方法流程见图 1。

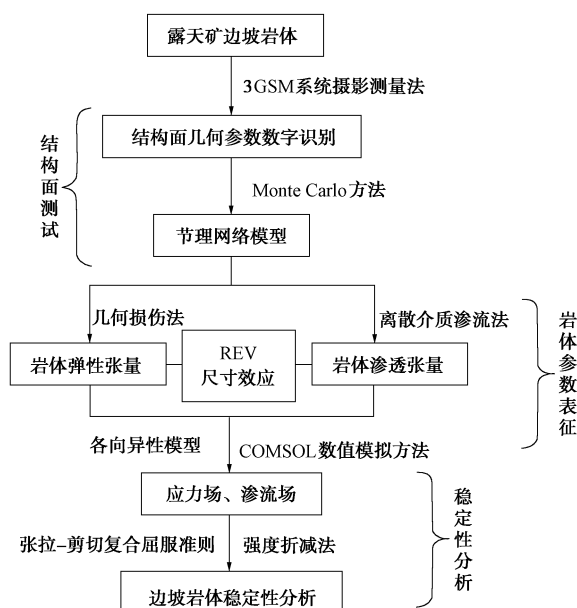


图 1 露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法流程图

Fig. 1 Flow chart of anisotropic analysis method for stability of open-pit mine slope rock mass

1 各向异性岩体渗流应力耦合模型

IV、V 级结构面 (又称统计结构面) 相对于工程大尺度而言非常小, 因此可将其简化为等效连续介质, 考虑到节理分布规律导致的岩体各向异性特征, 本文将采用下面的岩体多物理场耦合控制方程。

1.1 应力控制方程

应力和孔隙水压力共同作用下, 根据 Terzaghi 有效应力原理, 有效应力准则表示为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} = C \varepsilon_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (1)$$

平面应变条件下

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{E_1 E_3 (E_3 v_{32}^2 - E_2)}{\Delta} & \frac{-E_1 E_3 (E_2 v_{13} + E_3 v_{12} v_{32})}{\Delta} & 0 \\ \frac{-E_1 E_3 (E_2 v_{13} + E_3 v_{12} v_{32})}{\Delta} & \frac{E_3^2 (E_1 v_{12}^2 - E_2)}{\Delta} & 0 \\ 0 & 0 & G_{13} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,

$\Delta = -E_2 E_3 + E_1 E_2 v_{13}^2 + E_1 E_3 v_{12}^2 + E_3^2 v_{32}^2 + 2E_1 E_3 v_{12} v_{13} v_{32}$, E_i 为 i 方向的弹性模量, v_{ij} 为泊松比。

平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + F_j = 0 \quad (3)$$

几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

式中 F 为体力项; p 为孔隙水压力; α 为孔隙水压力系数; δ_{ij} 为 Kronecker 常数; σ_{ij} , σ'_{ij} , ε_{ij} 分别为总应力、有效应力和总应变, u_i , u_j 为位移; C 为刚度矩阵。

1.2 渗流控制方程

多孔介质地下水渗流服从 Darcy 定律, 稳态渗流中用渗透张量表示的渗流控制方程为

$$K_{ij} \nabla^2 p = 0 \quad (5)$$

基于 Louis 总结的经验公式^[15], 渗透主轴与弹性主轴一致条件下, 主渗透系数与应力的关系可表示为

$$K'_{ij} = \begin{bmatrix} K'_{11} e^{-\beta \sigma'_{33}} & 0 \\ 0 & K'_{33} e^{-\beta \sigma'_{11}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据坐标变换关系, 直角坐标系下任意方向的渗透系数张量则为

$$K_{ij} = [L^{-1}]^T K'_{ij} [L^{-1}] \quad (7)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 K_{ij} 为岩体渗透张量; K'_{11} , K'_{33} 分别为弹性主轴方向的初始渗透系数; σ'_{33} , σ'_{11} 分别为对应于 K'_{11} , K'_{33} 所在方向的法向有效应力; β 为耦合参数; $[L]$ 为方向余弦的变换矩阵; θ 为渗透主轴方向与坐标系方向的夹角。

1.3 模型的有限元求解

各向异性岩体渗流应力耦合模型本质是由一系列非线性偏微分方程构成, 即考虑了岩体变形又考虑了地下水流动及应力、流体压力变化造成的渗透系数张量变化, 其解是相互耦合的, 即使赋予合适的边界条件, 也难以得到解析解。因此, 对于复杂的边坡工程问题, 采用有限元法对模型数值求解是一种非常有效

的计算方法, 本文以 COMSOL Multiphysics 软件 (一个专门求解基于偏微分方程组的多物理场耦合过程的有限元分析工具, 内嵌了多种物理场, 并允许在其基础上二次开发) 为平台, 根据模型来自定义函数, 并嵌入至内置的 PDE 方程, 同时设置交叉变量, 采用不完全 LU 分解的显式迭代实现对模型的数值求解, 求解精度为 1×10^{-6} 。

2 工程实例分析

依托抚顺西露天矿南帮边坡工程实际, 按照露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法流程 (见图 1), 对该露天矿边坡岩体稳定性进行实例分析。

2.1 工程概况

抚顺西露天煤矿开采至今约有百年历史, 坡高约 400 m, 最终境界东西长约 6.6 km, 南北宽约 2.2 km, 是典型的露天矿高陡边坡。2009 年以来, 该露天矿南帮坡顶千台山出现了地表大裂缝 (如图 2), 裂缝距离采场边界 200~300 m 左右; 同时坡底-309 泵站出现底鼓, 高约半米 (如图 3)。现场地质勘察显示南帮岩体以玄武岩为主, 结构面非常发育且大面积出露, 多为卸荷节理面和风化裂隙 (V 级), 局部有出水点显露, 该区玄武岩岩石强度高 (抗拉强度为 10.5 MPa, 内聚力为 15.4 MPa, 摩擦角为 56°), 因此结构面发育特征对南帮岩体变形破坏至关重要。



图 2 坡顶变形破坏图

Fig. 2 Deformation failure of slope top



图 3 坡底-309 泵站底鼓

Fig. 3 Floor heave of slope bottom at -309 pumping station

根据现场监测结果, 南帮变形破坏最严重区域主

要集中在 E1200 剖面, 因此本文将该剖面作为重点研究对象。钻探资料显示该剖面含有不同深度的 3 个煤夹凝灰岩不整合接触带, 便于描述简称为弱层, 由浅到深依次编号为 1, 2, 3 (如图 4)。#3 弱层与边坡临空面之间, 岩体受结构面切割明显, 结构面发育, 是结构面主要影响区域, 也是本文的研究重点; #3 弱层以下结构面不发育, 岩体相对较完整。图 4 中灰色线为实测水位线。

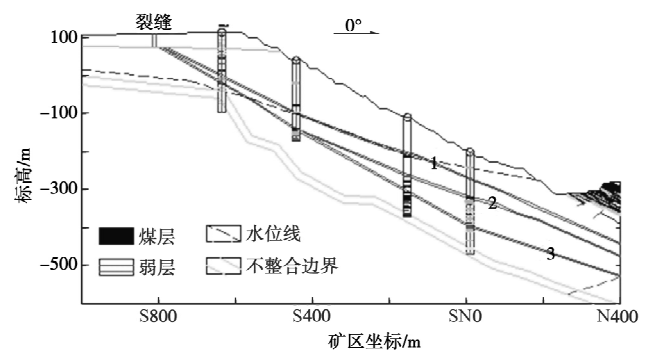


图 4 E1200 地质剖面图

Fig. 4 Geological section of E1200

2.2 岩体结构面几何参数识别

(1) 结构面测试系统

3GSM 系统是由奥地利 Startup 公司开发的一套岩体几何参数三维非接触测量系统^[16], 可以提供真实的岩体三维图像, 通过软件处理来得到岩体大量、详实的几何测量数据, 记录岩体不连续面的空间展布, 可以实时测量且不受地形限制, 特别适用于矿山不断开挖揭露、数目巨大的结构面数据采集。

该系统通过对同一测试区域两个不同角度进行成像 (左、右视图), 通过像素匹配技术进行三维几何图像合成, 并进行一系列技术处理 (基准标定、像素点匹配、图像变形偏差纠正), 实现岩体显露面真三维模型重构 (如图 5)。

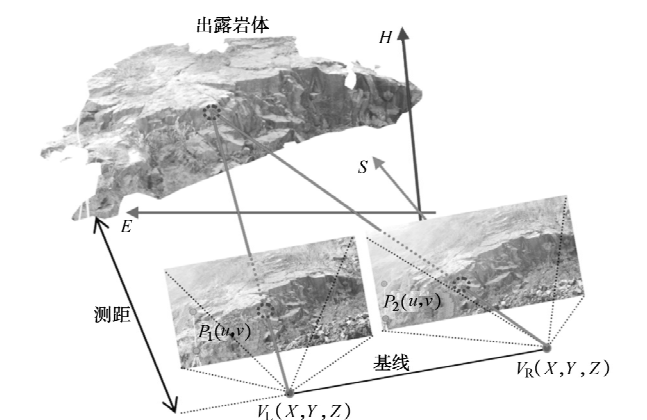


图 5 三维图像合成原理

Fig. 5 Imaging principle of 3D surface measurement

(2) 结构面测试方案

本次研究区域集中在南帮 E1200 剖面, 测试目的是为了获取该研究区域结构面的分布规律。因此, 结

合现场条件 (结构面有代表性、出露较清晰、没有大面积浮土或植被覆盖), 在研究区域内, 依据沿着边坡剖面台阶梯度方向, 多次采样统计分析的原则尽可能多的布置测点, 本次测试共布置了 6 个测点 (见图 6)。

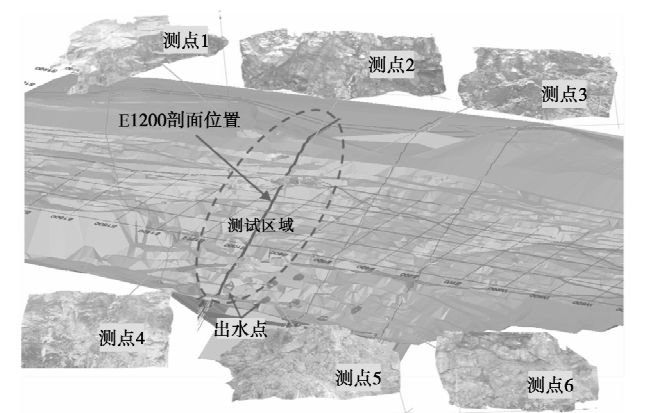


图 6 研究区域内测点布置

Fig. 6 Positions of measuring points in survey area

(3) 结构面概率模型统计

以测点 1 为例, 根据主要节理裂隙的空间展布情况, 对其进行分组, 该测点主要节理可分为 3 组 (见图 7, 8)。

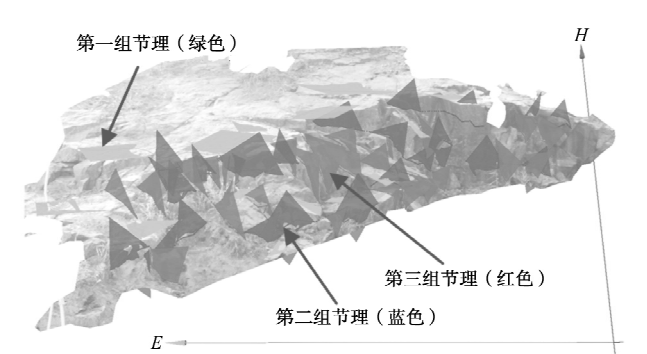


图 7 节理分布情况

Fig. 7 Distribution of joints in rock mass



图 8 节理迹线分布

Fig. 8 Distribution and spacing of joints

为了得到研究区域的结构面分布规律, 需对所有

测点结构面逐一识别, 获取全部测试结构面几何信息汇总分析。现场 6 个测点 1000 多条结构面几何参数(倾向、倾角等) 统计结果显示, 该研究区域有 3 组主要节理发育程度较高, 其概型统计如表 1。

表 1 抚顺西露天矿南帮结构面概率模型

Table 1 Probabilistic model of discontinuities of southern slope of Fushun west open-pit mine

结构面几何参数特征		结构面分组		
		1	2	3
倾向/(°)	概型	正态	对数正态	对数正态
	均值	339	285	106
	标准差	6.2	12.4	20.7
倾角/(°)	概型	正态	正态	正态
	均值	34	52	54
	标准差	4.5	8.3	10.8
迹长/m	概型	正态	对数正态	正态
	均值	2.5	1.35	1.5
	标准差	5.7	6.6	6.2
间距/m	概型	对数正态	对数正态	对数正态
	均值	1.3	2.0	2.2
	标准差	16.8	12.0	9.9
断距/m	概型	对数正态	对数正态	对数正态
	均值	0.8	1.7	1.4
	标准差	6.6	14.0	9.2
隙宽/m	单一值	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}

(4) 节理网络模型

虽然测试的是岩体表面的结构面, 但是结构面倾向、倾角等均为真实的几何信息。由于边坡不同位置结构面出露面积不同, 并且结构面具有一定的空间延展性, 再者, 对于多个不同测点的众多现场结构面实测数据, 获取的是统计角度的分布规律, 因此可以近似的将其推广到岩体整体的节理分布。

为了得到二维剖面节理网络模型, 需要对节理几何参数进行变换, 即在一定产状的剖面上, 每一条迹线代表一条结构面, 该迹线的产状由伪倾角 θ 唯一确定, θ 角由下式计算:

$$\theta = \arctan[\tan \theta' \cdot \cos \omega] \quad , \quad (9)$$

式中, θ' 为结构面的真倾角, ω 为结构面走向与剖面走向的夹角。

一组结构面的实际间距为 l' , 那么剖面上结构面间距 l 可表示为

$$l = \frac{l'}{|\cos(x - x')|} \quad , \quad (10)$$

式中, x 为剖面走向, x' 为结构面走向。

利用 Monte Carlo 方法, 根据结构面统计分布规律反求各参数的(伪)随机数(见表 2), 生成与真实岩体结构在统计上完全等效的二维节理网络模型, 获取表征单元体, 如图 9 所示。

2.3 各向异性岩体参数表征

节理岩体各向异性参数指的是岩体宏观等效张量参数, 是进行岩体力学分析的基础, 但是却没有统一

的标准, 文献[17, 18]从试验和数值模拟角度在节理岩体等效张量参数确定方面做出了有意义的探索, 均表明研究岩体各向异性参数不能忽略尺寸效应。

表 2 E1200 剖面结构面伪参数

Table 2 Pseudo parameters of E1200 profile

结构面(伪)参数		结构面分组		
		1	2	3
倾角/(°)	均值	14	51	53
迹长/m	均值	2.5	1.35	1.5
间距/m	均值	3.6	2.1	2.3
断距/m	均值	2.2	1.76	1.46

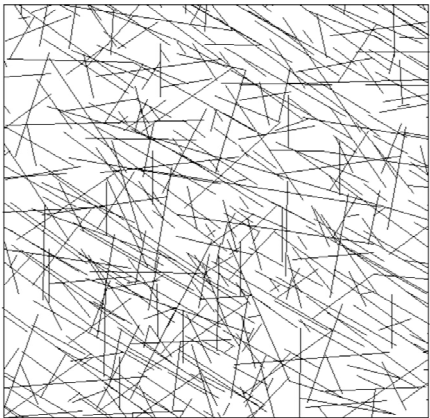


图 9 二维节理岩体表征单元体

Fig. 9 REV of 2D jointed rock mass

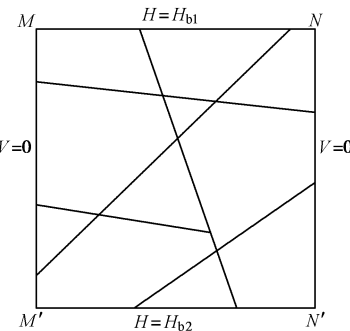


图 10 渗流区内裂隙网络示意图

Fig. 10 Fracture network in seepage area

(1) 岩体渗透张量参数

a) 离散介质网络模型

节理裂隙连通是流体流动的主要通道, 对于二维渗流区域, 假定区域边界 MN 和 $M'N'$ 为定水头边界, MM 和 NN 为零流量边界, 若渗流区域内有 N 个节点, 那么根据流体流动的质量守恒方程及边界条件可将节理网络渗流数学模型表示为

$$\left. \begin{aligned} Aq + Q &= 0 \quad (\text{域内}), \\ H|_{MN} &= H_{b1}, \\ H|_{M'N'} &= H_{b1}, \\ \partial H / \partial n|_{MM', NN'} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}^T$; $q = \{q_1, q_2, \dots, q_M\}^T$; $A = \{a_{ij}\}_{N \times M}$ 为裂隙网络的 $N \times M$ 阶衔接矩阵, 描述了裂隙

网络系统中线元与节点的衔接关系。对于线元的流量可由单一隙宽渗流立方定律求得, 即

$$q_j = \frac{\gamma b_j^3 \Delta h_i}{12\mu l_j} \quad (12)$$

式中, h_i 为水头差, μ 为水的黏度系数, γ 为水重度, b 节理水力开度。

b) 各向异性等效渗透系数

依据连续介质各向异性和均匀性原理, 在离散介质模型内, 通过计算流体流入 (或流出) 研究区域的流量, 利用达西定律可得到网络整体的渗透系数。通过编制程序, 课题组已经形成了较完善的求解方法, 并在范各庄煤矿取得了较好的应用^[19], 具体计算细节本文不再赘述。

计算方案为在节理网络模型中以任一固定点为中心, 分别选取单元边长 3, 5, 7, 8, 9, 10 m 的表征单元体, 对于每一固定尺寸的单元体, 以形心 O 为中心, 按照逐步顺时针旋转 15° 方法 (如图 11), 求解不同方位的渗透系数。

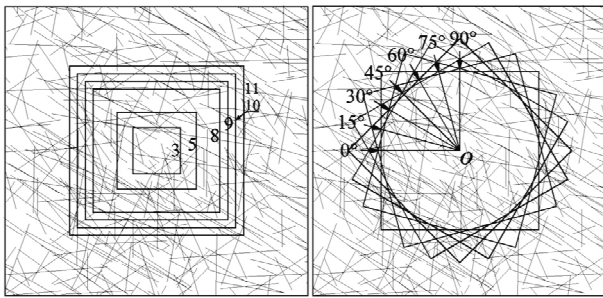


图 11 岩体张量参数计算方案

Fig. 11 Computational scheme for tensor parameters of rock mass

渗透张量计算结果如图 12 所示。由图可知, 表征单元体尺寸为 9 m 时, 误差仅有 2.2%, 可以认为岩体渗透参数的表征单元体最小尺寸为 $9\text{ m} \times 9\text{ m}$, 优势节理方向为顺倾 30° 。最大渗透系数为 $K_{\max} = 2.43 \times 10^{-5}\text{ m/s}$, 最小渗透系数为 $K_{\min} = 7.98 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $K_{\max}/K_{\min} = 3.05$, 体现了渗透各向异性。

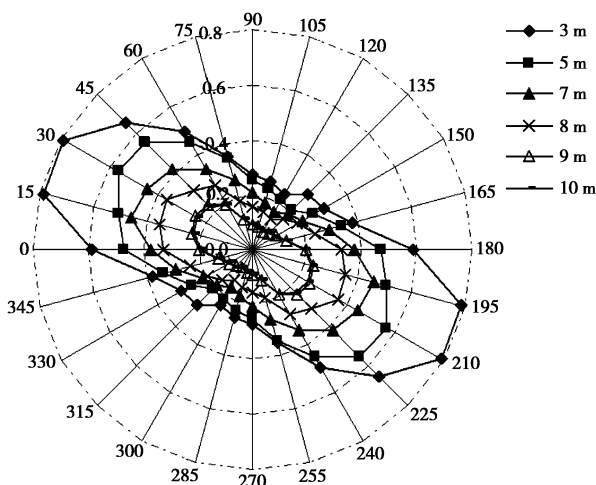


图 12 渗透系数张量计算结果

Fig. 12 Results of hydraulic conductivity tensor

通过西露天矿现场不同位置钻孔降水头试验, 测得玄武岩岩体的渗透系数 $K = 1.55 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, 结构面测试结果是现场试验的 5~16 倍, 这表明岩体内部结构面张开度较表面小。根据现场实测结果, 对渗透张量进行修正, 具体方法为: 将实测结果作为水平方向渗透系数值, 即图 9 中表征单元尺寸为 9 m, 0° 对应的渗透系数为 $K_0 = 1.55 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, 按照比例关系对其余角度值进行修正, 得到西露天矿南帮岩体的渗透系数: $K_1 = 1.95 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $K_3 = 0.64 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $K = 1.55 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 。

(2) 岩体弹性张量参数

a) 岩体几何损伤张量

岩体中存在大量节理裂隙, 其尺度与岩体结构相比可忽略不计, 可利用连续损伤介质力学研究这类岩体结构。因此本文根据川本眺万 (Kawamoto) 等提出的几何损伤理论和计算方法, 将节理视为岩体初始损伤, 采用二阶对称矩阵表示岩体的损伤张量^[20]

$$D_{ij} = \frac{l}{V} \sum_{k=1}^N a^k (n^k \otimes n^k) \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (13)$$

式中, N 为节理面条数, l 为节理面最小间距, V 为岩体体积, n^k 为第 k 条节理面法向矢量, a^k 为第 k 条节理面面积, 二维情况下 a^k 为第 k 条节理迹长。

仍采取图 11 计算方案, 岩体损伤张量计算结果如图 13, 由图知, 当表征单元体尺寸为 9 m 时, 误差仅有 3%, 基本趋于稳定。因此取表征单元体最小尺寸为 $9\text{ m} \times 9\text{ m}$, 优势节理方向为顺倾 30° , 与渗透张量计算结果一致, 表明西露天矿南帮岩体渗透主方向与弹性主方向一致。损伤张量为 $D_{\min} = 0.36$, $D_{\max} = 0.53$ 。若将岩体视为各向同性体, 不考虑优势节理方向的影响, 损伤变量 D 按照 $\eta = \theta + 45^\circ$ 在损伤张量椭圆中对应取值为 $D' = 0.41$, 该取值方法仅为本文的对比分析提供一个参照。

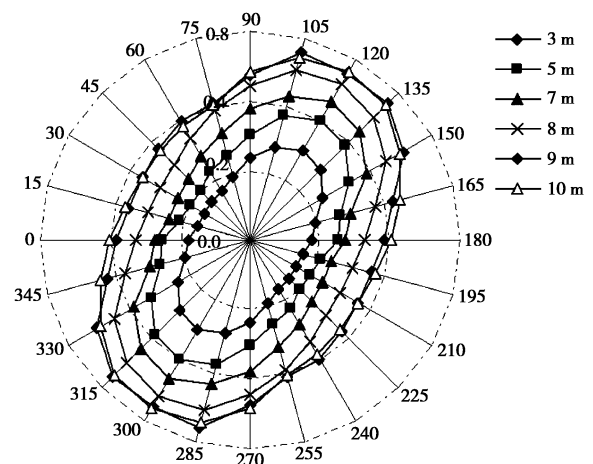


图 13 二维损伤张量计算结果

Fig. 13 Results of 2D damage tensor

b) 各向异性等效弹性参数

损伤理论中岩体各向异性变形模量与损伤主值之间的关系^[21]为

$$E_i = E_0(1 - D_i)^2 \quad , \quad (14)$$

式中, E_i 为岩体材料 i 方向的弹性模量, E_0 为岩块的弹性模量。

玄武岩岩块物理力学参数可通过现场岩心取样, 室内常规岩石力学实验得到: 弹性模量 $E_0=65.6$ GPa, 泊松比 $\nu_0=0.2$, 抗拉强度 $\sigma_t=10.5$ MPa, 内聚力 $c=15.4$ MPa, 摩擦角 $\varphi=56^\circ$, 不再细述。根据式 (14) 计算求得岩体的弹性参数: $E_1(E_2)=26.9$ GPa, $E_3=14.5$ GPa, $E_1/E_3=1.85$, $E=22.8$ GPa。

2.4 有限元分析与讨论

(1) 数值计算模型

根据西露天矿南帮 E1200 剖面工程实际, 建立二维边坡数值模型。以#3 弱层为边界, 其上至边坡临空面之间岩体 (浅部岩体) 受结构面影响较明显, 计算采用各向异性模型; 其下部分岩体 (深部岩体) 相对完整, 计算采用各向同性模型。对模型施加如下边界条件:

- a) 两侧边界均约束法向位移, 下底边固定; 受重力 ($\gamma=28$ kN/m³) 作用, 允许自由沉降。
- b) 两侧边根据实际情况均为定水头边界; 边坡表面为自由边界, 无降雨补给; 底边界不透水。模型几何尺寸及边界条件如图 14 所示。

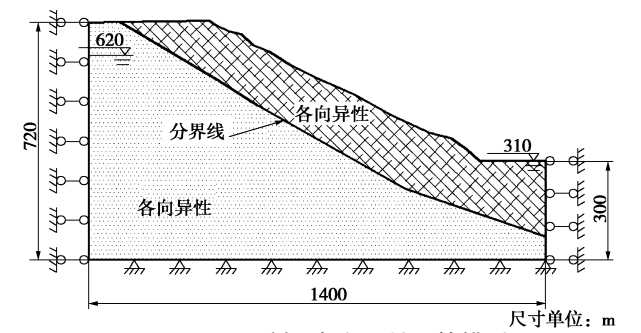


图 14 E1200 剖面各向异性计算模型

Fig. 14 Computational model for anisotropy of E1200 section

另外将浅部岩体作为各向同性体, 其余各条件均保持不变, 建立各向同性计算模型为各向异性模型提供对比。数值计算参数如表 3 所示。

表 3 岩体变形和渗透参数

Table 3 Deformation and infiltration parameters of rock mass				
岩体类型		弹性模量 /GPa	泊松比	渗透系数 /(10 ⁻⁶ m·s ⁻¹)
浅部	各向异性	$E_1=26.9$	$\nu_{12}=0.2$	$K_1=1.95$
		$E_2=26.9$	$\nu_{13}=0.23$	$K_3=0.64$
		$E_3=14.5$	$\nu_{32}=0.26$	
	各向同性	22.8	0.28	1.55
深部	各向同性	45	0.22	1.05

(2) 分析与讨论

采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件, 分别基于各向异性和各向同性模型对 E1200 剖面边坡岩体稳定性进行数值模拟。

a) 渗流场对比

图 15 为向异性模型计算的地下水渗流场分布情况, 由于浅部岩体中节理在顺坡向密集展布, 节理连通性好, 裂隙水在该方向渗透性强 ($K_1>K_3$), 地下水更容易沿坡向渗出, 潜水面降低。如果不考虑岩体各向异性, 即忽略裂隙水渗透方向性, 则地下水沿坡面渗透性较各向异性弱, 潜水面偏高, 如图 16。

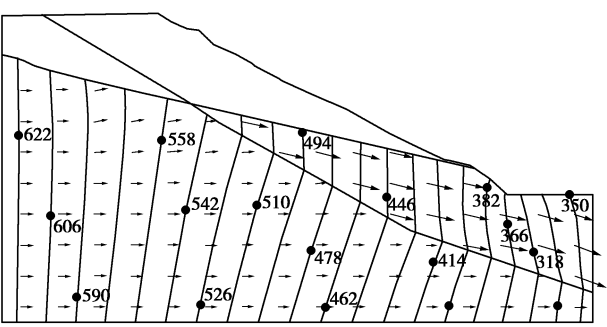


图 15 各向异性渗流场

Fig. 15 Anisotropic seepage fields

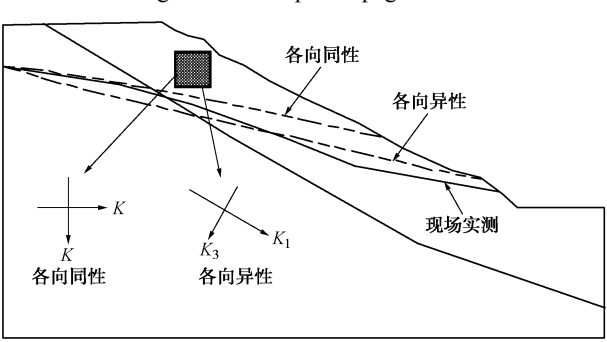


图 16 不同模型计算潜水面位置对比

Fig. 16 Comparison of results of water tables of different models

b) 剪应力对比

图 17 可直观看出, 各向异性模型与各向同性模型计算的边坡剪应力场差异显著, 各向异性模型计算的剪应力集中现场产生在坡脚附近, 而各向同性模型计算剪应力在坡底距离坡脚一定距离处集中。

c) 损伤区对比

应力场作为岩体的基本物理场, 能够反映出岩体任一点所处的应力状态, 而强度准则表征岩体极限应力状态的破坏判据, 建立在应力场基础之上, 当一点的应力状态满足强度准则便可视作损伤区。各向异性强度准则目前还处于研究阶段^[22], 作者在分析巷道损伤区时采用了 Hoffman 各向异性强度准则, 虽然得到了一定规律性认识, 但其中所需的各向异性强度参数多且难以确定, 工程应用极不方便^[23], 因此本文从工程应用角度出发, 采用各向同性的张拉-剪切复合屈服准则分析边坡损伤区。

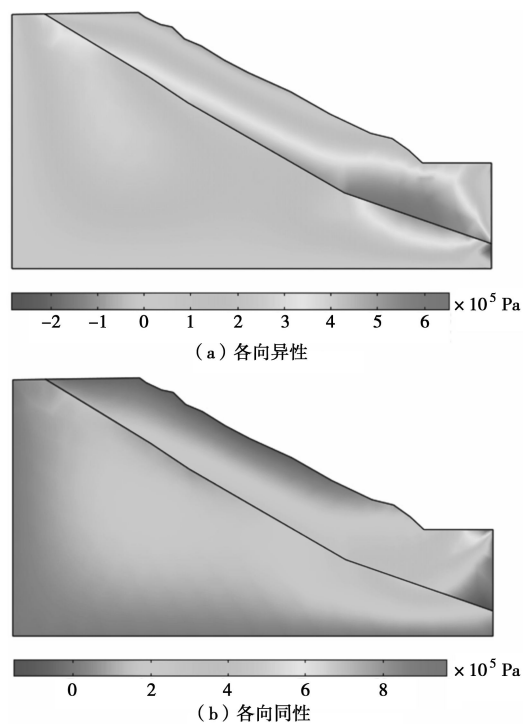


图 17 剪应力对比

Fig. 17 Comparison of shear stress

张拉-剪切复合屈服准则^[24]可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 &= \sigma_t, \\ \sigma_1 &= \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 σ_1 , σ_3 分别为最大、最小主应力; σ_t 为岩体

抗拉强度, 按照岩体力学习惯以压为正, σ_t 则为负。
 c 为内聚力, φ 为摩擦角。

为了研究抚顺西露天矿南帮 E1200 剖面渐进破坏规律, 引入强度折减法, 模拟计算不同折减系数 (即强度储备安全系数) 的边坡损伤区, 具体折减方法为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tf} &= \sigma_t / f, \\ c_f &= c / f, \\ \varphi_f &= \tan^{-1}(\tan \varphi / f). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 f 为基于强度储备的安全系数; σ_t , c , φ 分别为初始抗拉强度, 黏聚力, 摩擦角; σ_{tf} , c_f , φ_f 分别为折减后抗拉强度, 黏聚力, 摩擦角。

计算中采用的岩体初始强度参数根据工程经验类比确定, 不同深度的岩体强度参数如表 4 所示。

表 4 岩体初始强度参数

Table 4 Initial strength parameters of rock mass			
岩体	黏聚力 c /MPa	摩擦角 φ ($^{\circ}$)	抗拉强度 σ_t /MPa
浅部	0.24	29	0.27
深部	1.20	40	1.10

边坡损伤区计算结果如图 18, 图 19 所示。其中图 18 为各向异性模型计算结果, 由图可知, 当岩体强度储备安全系数为 1.0 时, 如图 18 (a), 坡顶弱层交界处产生损伤区与地表大裂缝基本吻合, 坡底损伤区与坡脚底鼓变形相吻合, 同时边坡上部表面有局部拉伸损伤区。此时损伤区面积均较小, 只反映了初始损

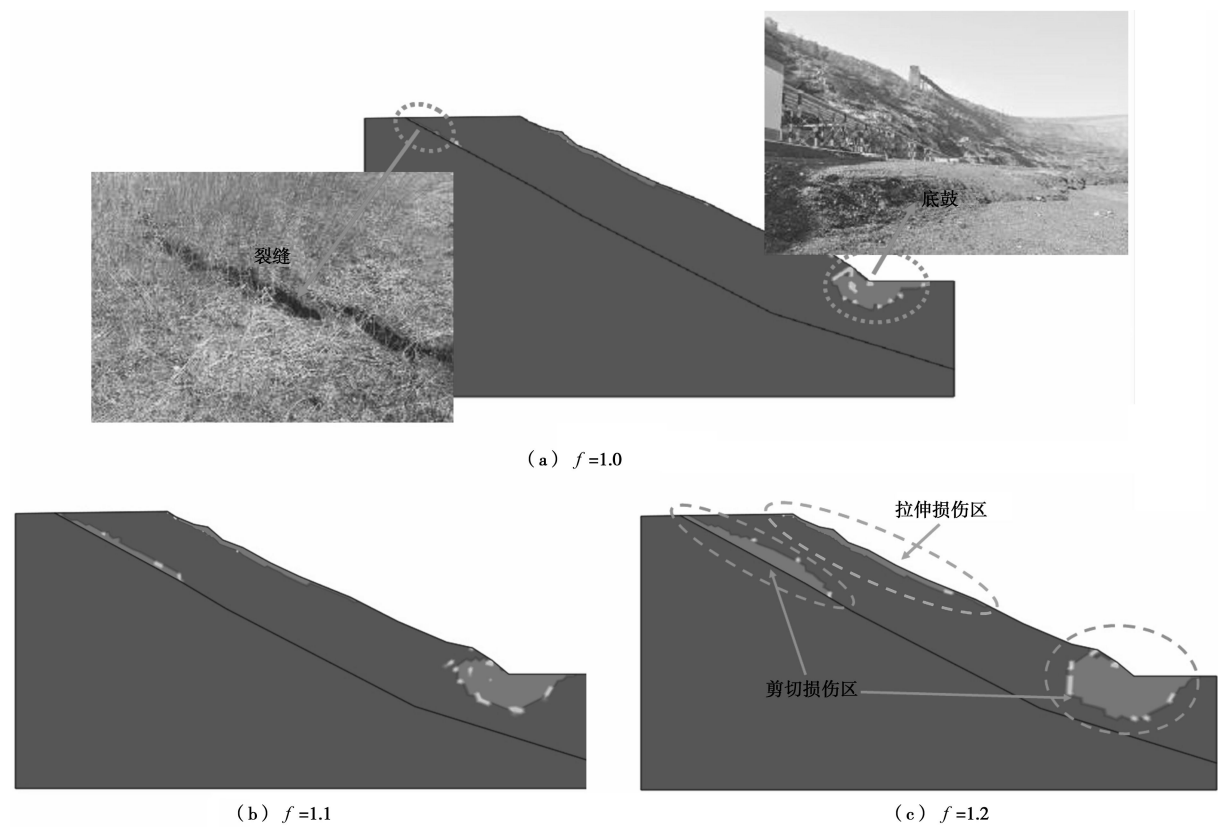


图 18 各向异性损伤区演化规律

Fig. 18 Variation of damage zone calculated by using anisotropic model

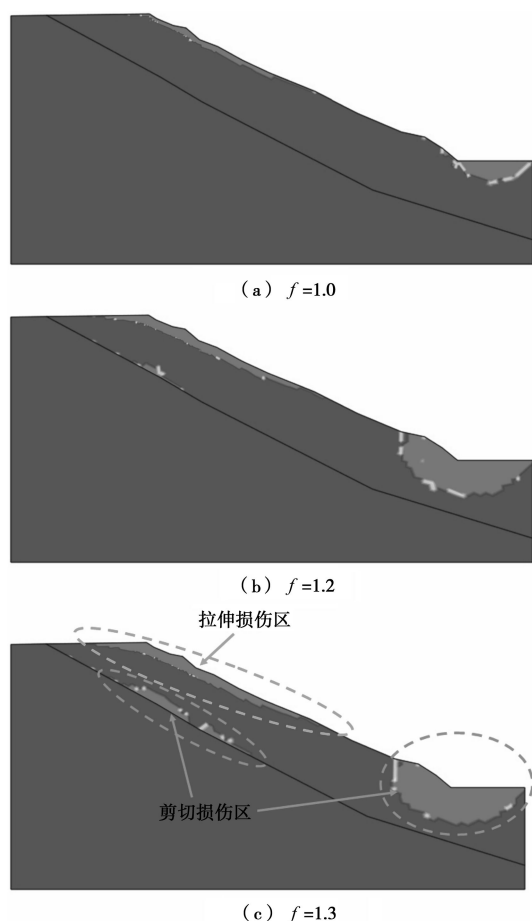


图 19 各向同性损伤区变化规律

Fig. 19 Variation of damage zone calculated by using isotropic model

伤区产生位置, 说明了当前边坡的极限平衡状态。随着强度储备安全系数不断提高, 边坡损伤区范围逐渐扩大, 坡顶部分损伤区将沿着弱层边界向下迅速发展; 同时, 坡脚损伤区面积渐增, 且向坡顶方向扩展。当强度储备安全系数为 1.2 时, 如图 18 (c), 损伤区面积已经非常可观, 表明了当前边坡难以满足边坡安全系数储备 1.2 的要求, 亟需采取安全防护措施。坡顶和坡脚损伤区渐进扩展规律, 呈现出一定贯通趋势, 表面边坡存在整体滑移可能性, 初步建议采取内排压脚的变形防治措施, 有待进一步分析。图 19 为各向同性模型计算结果, 该结果显示的初始压剪损伤区首先产生于坑底而非坡脚处。随着强度储备安全系数不断增大, 坡角处损伤区渐进产生并逐步扩大, 但是坡顶却没有损伤区出现, 而在边坡内部弱层交界处产生, 与实际不符。这也说明了抚顺西露天矿南帮变形破坏为顺倾结构面控制的剪切型破坏。

3 结 论

依托抚顺西露天矿南帮边坡工程实例, 提出了系统的露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法: 首先

应用 3GSM 系统对岩体出露结构面进行现场测试, 获取结构面几何参数的概率统计; 然后根据 Monte Carlo 方法生成裂隙网络, 分别利用离散介质渗流方法和几何损伤理论, 在分析 REV 尺寸效应基础上, 计算岩体渗透张量和弹性张量, 实现岩体参数表征; 最后基于等效连续介质模型, 建立各向异性岩体渗流应力耦合模型, 采用 COMSOL 有限元软件分析边坡岩体稳定性。应用该方法对西露天矿南帮岩体稳定性研究得到如下结论:

(1) 提出的露天矿边坡岩体各向异性分析方法能够反映实际节理分布导致的岩体各向异性特征, 简单合理, 便于工程应用。

(2) 西露天矿南帮岩体目前处于极限平衡状态, 变形破坏为顺倾结构面控制的剪切型破坏; 坡脚底鼓与坡顶裂缝以^{#3}弱层为边界呈现出贯通趋势, 存在整体滑移的可能性。

(3) 该研究为各向异性分析方法的工程应用提供了示例。由于计算损伤时采用的是各向同性强度准则, 虽然可满足工程需要, 但理论不够严密, 有待开展进一步研究, 尤其是对各向异性强度参数的研究, 为各向异性强度准则的应用提供科学合理的基础数据。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 23 - 57. (SUN Guang-zhong. Rock mass structure mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1998: 23 - 57. (in Chinese))
- [2] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 82 - 87. (CAI Mei-feng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 82 - 87. (in Chinese))
- [3] BUDIANSKY B, O'CONNELL R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. International Journal of Solids Structures, 1976, 12(2): 81 - 97.
- [4] 张梅英, 袁建新, 李延芥, 等. 单轴压缩过程中岩石变形破坏机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 1 - 8. (ZHANG Mei-ying, YUAN Jian-xin, LI Ting-jie, et al. Mechanism of deformation and failure for rock in uniaxial compression test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [5] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329 - 1364.
- [6] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析用 (RFPA^{2D}) 系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 24 - 29. (ZHU Wan-cheng, TANG

- Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 24 - 29. (in Chinese))
- [7] CAI M, KAISER P K, UNO H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 3 - 19.
- [8] 邬爱清, 柳赋铮. 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1513 - 1523. (WU Ai-qing, LIU Fu-zheng. Advancement and application of the standard of engineering classification of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1513 - 1523. (in Chinese))
- [9] SHI G H. Discontinuous deformation analysis: A new numerical model for the static and dynamics of block system[D]. Berkeley: University of California, 1988.
- [10] 邬爱清, 丁秀丽, 卢波, 等. DDA 方法块体稳定性验证及其在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 664 - 672. (WU Ai-qing, DING Xiu-li, LU Bo, et al. Validation for rock block stability and its application to rock slope stability evaluation using DDA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 664 - 672. (in Chinese))
- [11] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (SUN Guang-zhong. Rock mass mechanics foundation[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [12] 薛守义. 论连续介质概念与岩体的连续介质模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 230 - 232. (XUE Shou-yi. Basic aspects of mechanics rockmass as continuous medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 230 - 232. (in Chinese))
- [13] 张有天. 裂隙岩体渗流数学模型研究现状[J]. 人民长江, 1991, 22(3): 1 - 10. (ZHANG You-tian. Research status of mathematical model of seepage[J]. Yangtze River, 1991, 22(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [14] NEUMAN S P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(1): 124 - 147.
- [15] LOUIS C. Rock hydraulics[M]// Rock Mechanics, MULLER L, ed. Springer, 1974: 299 - 387.
- [16] 奥地利 Startup 公司. ShapeMetriX3D 系统使用手册[R]. 沈阳: 欧美大地仪器设备中国有限公司, 2008. (Startup Company from Austrian. ShapeMetriX3D service manual [R]. Shenyang: Earth Products China Limited, 2008. (in Chinese))
- [17] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 243 - 250. (YAN Dong-xu, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 243 - 250. (in Chinese))
- [18] 杨建平, 陈卫忠, 吴月秀, 等. 裂隙岩体等效渗透系数张量数值法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1183 - 1188. (YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, WU Yue-xiu, et al. Numerical study on equivalent permeability tensor of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1183 - 1188. (in Chinese))
- [19] 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 FANGEZHUANG coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2482 - 2489. (in Chinese))
- [20] MURAKAMI S. Mechanical modeling of material damage[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 9(8): 55 - 62.
- [21] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 165 - 170. (YU Tian-qing, QIAN Ji-cheng. Damage theory and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 165 - 170. (in Chinese))
- [22] 张贵科. 节理岩体正交各向异性等效力学参数与屈服准则研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG Gui-ke. Study on equivalent orthotropic mechanical parameters and yield criterion of jointed rock mass and its engineering application[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [23] 杨天鸿, 师文豪, 于庆磊, 等. 巷道围岩渗流场和应力场各向异性特征分析及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1815 - 1822. (YANG Tian-hong, SHI Wen-hao, YU Qing-lei, et al. The anisotropic properties analysis of rock mass surrounding the roadway's in seepage and stress field[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1815 - 1822. (in Chinese))
- [24] 戴自航, 卢才金. 边坡失稳机理的力学解释[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1191 - 1197. (DAI Zi-hang, LU Cai-jin. Mechanical explanations on mechanism of slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1191 - 1197. (in Chinese))