

引用格式: 李常虎, 李征征, 王群, 2022. 西南某水电站拱坝建基岩体缓倾结构面的连通率分析方法 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 948-955. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222822

Citation: LI C H, LI Z Z, WANG Q, 2022. Analysis of the connectivity rate of the gently dipping structural plane of the foundation rock of an arch dam of a hydropower station in southwest China [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 948-955. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222822

西南某水电站拱坝建基岩体缓倾结构面的连通率分析方法

李常虎, 李征征, 王群

LI Changhu, LI Zhengzheng, WANG Qun

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065

Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Analysis of the connectivity rate of the gently dipping structural plane of the foundation rock of an arch dam of a hydropower station in southwest China

Abstract: The connectivity rate plays an essential role in the stability evaluation of engineering rock masses such as slopes and dam foundations. This paper takes the foundation rock mass of an arch dam of a hydropower station in southwest China as the research object. Based on the field-measured data and the self-developed fissure network simulation program, we used the Monte-Carlo stochastic simulation method to calculate the connectivity rate of the gently dipping structural planes and the strength parameters in different shear directions of rock mass on the left and right bank of the hydropower station. The results show that the connectivity rate of the left and right banks of the hydropower station is different in different shear directions, and the overall fissure connectivity rate is low. The fissure connectivity rate of the gently dipping structural planes at PD02 on the right bank is about 27.35%, the friction coefficient is 1.04, and the cohesion is 0.89 MPa. The research results can provide a theoretical reference for this and similar projects.

Keywords: low-angle dip; intermittent joint; connectivity rate; Monte-Carlo

摘要: 连通率是岩体内部结构面发育尺寸及贯通程度的重要指标, 决定着岩体的工程力学特性, 对边坡、坝基等工程岩体的整体强度和稳定性评价等发挥着至关重要的作用。以西南地区某水电站拱坝建基典型岩体缓倾结构面为研究对象, 根据现场岩体实测数据, 基于自行开发的裂隙网络模拟程序, 采用蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 随机模拟方法对水电站左、右岸岩体不同剪切方向下缓倾结构面的连通率和岩体强度参数开展研究。研究表明: 该水电站左、右岸岩体在不同剪切方向上的连通率是不同的, 通过不同方向的角度旋转, 总体获得的裂隙连通率较低; 水电站右岸平洞 PD02 处缓倾角结构面的裂隙连通率约在 27.35% 左右, 摩擦系数为 1.04, 黏聚力为 0.89 MPa。研究成果可为水电工程建设提供理论参考和借鉴。

关键词: 缓倾角; 断续节理; 连通率; 蒙特卡洛

中图分类号: [TU42] 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 06-0948-08

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222822

0 引言

连通率作为反映随机结构面连通状况和延伸

程度的一个重要的几何参数 (Einstein et al., 1983; 王乐华等, 2015; 孙平等, 2020), 在工程岩体的稳定性评价方面起着关键的控制作用 (石露等, 2012; 刘冲平等, 2014; 周洪福等, 2021;

基金项目: 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司科技项目 (XBY-KJ-2019-19)

This research is financially supported by the Scientific Project of the Northwest Engineering Corporation Limited (Grant XBY-KJ-2019-19)

第一作者简介: 李常虎 (1976—), 男, 硕士, 主要从事水电工程地质勘察工作。E-mail: 403268047@qq.com

通讯作者: 李征征 (1991—), 男, 硕士, 主要从事水电工程地质勘察工作。E-mail: lizhengzh@nwh.cn

收稿日期: 2022-06-05; 修回日期: 2022-09-18; 责任编辑: 范二平

Zhang et al., 2022)。连通率是指沿结构面延伸方向上节理各段长度之和与测线长度的比值(周喻等, 2015; 杨忠平等, 2020; 李忠等, 2021), 它能够反映节理的贯通程度, 对岩体的强度、变形、渗透性和破坏机制等均有较大影响(朱容辰, 2015; 李彬等, 2022), 通常在 0~1 范围内变化。因此, 为保障岩体工程的合理设计和安全施工, 深入开展结构面连通率计算的研究是有必要的(Derski et al., 2012)。

目前, 大量学者开展了结构面连通率对岩体力学行为影响的试验及理论研究工作。例如, 周洪福等(2021)以川西雅安地区典型的顺层岩质斜坡为例, 采用现场调查、无人机测绘、钻探、物探和稳定性计算等技术方法, 分析了不同工况条件下斜坡稳定性与层间破碎带连通率之间的关系; 刘冲平等(2014)采用定性定量相结合的分析方法, 通过对顺坡向外倾结构面连通率统计及其与岩桥组合的“底滑面”参数加权平均, 采取刚体极限平衡法计算了乌东德水电站高达 180 m 的进水口岩质边坡稳定系数, 通过分析连通率敏感性, 研究结构面连通率对此类边坡稳定性的重要程度; 周喻等(2015)采用等效岩体(ERM)技术, 将岩块和结构面分别用颗粒体模型及光滑节理模型表征, 构建了含不同连通率、不同节理倾角的等效岩体模型; 陈国庆等(2017)将声发射特征参数的研究与室内直剪试验相结合, 揭示了不同法向应力状态和不同连通率下断续结构面岩体的破坏规律; 王乐华等(2015)通过三轴加卸荷试验分析了卸荷条件下非贯通结构面试件的连通率与变形和强度特征之间的关系, 对比分析了 3 种结构面连通率条件下的预制非贯通节理岩体试件的应力-应变关系曲线特征、强度特征以及破坏形态; 王晓明等(2013)采用拟建模方法对乌东德坝区拱座岩体的三维裂隙开展了网络模拟; Liu et al. (2021)提出了一种结合随机采样共识算法的集成三维裂隙重建方法, 并应用于四川盆地多级压裂刺激的水平井中。陈新等(2011)系统地研究了张开断续节理岩体的应力-应变曲线、单轴压缩强度和弹性模量受结构面的产状和结构面连通率变化的影响程度; 严敏等(2021)利用核磁共振技术获得了不同孔隙率低透气性煤的孔隙结构数据, 并提出了用于分析煤体孔隙连通性的计算模型; 高明忠等(2012)借助改进后的钻孔

裂隙窥视仪, 以平顶山煤业集团某采煤工作面为试验基地, 分析了采动影响下工作面前方裂隙网络演化分形特征及连通率变化规律等。

岩体结构面的连通率是确定岩体抗剪强度参数和分析其稳定性的重要指标。目前, 主要有两种方法求解连通率: 一是基于结构面网络模拟的计算方法(汪小刚等, 1998; 杜景灿等, 2003; Xu et al., 2006), 二是基于实测的概率模型估算方法(黄润秋和范留明, 2003; 范留明和黄润秋, 2003)。近年来, 诸多学者在此两种方法的基础上提出了一些效率更高、准确性更好的改进方法。例如, 邱治强等(2016)为了更加精确地定量表征结构面网络连通率, 优化瓦斯钻孔布置位置, 提出了基于钻孔裂隙度概念的“等效体积原理”钻孔三维连通率新算法, 并引入盒维数验证了该算法的合理性。王贺等(2014)提出了一种基于钻孔数据的深埋岩体结构面连通率预测方法。吴琼等(2008)利用三维结构面网络模拟方法对贵阳某水利工程导流洞进口的岩体结构面进行模拟, 在其三维可视化模型的基础上求得模拟区内不同截面的三维连通率, 并利用三维连通率结果估算出岩体的综合抗剪强度参数。Li et al. (2018)基于岩体离散裂缝网络的三维模型, 提出了一种改进的投影计算三维力学连通率的方法。胡耀飞等(2011)通过分析和判别缓倾角硬性结构面相关数据, 运用三维空间投影图解求出了结构面连通率。

文中根据在西南某水电站右岸边坡平洞 PD02 处测得的缓倾角结构面倾向、倾角、间距和迹长等数据, 应用蒙特卡洛(Monte-Carlo)随机模拟方法, 利用自行开发的裂隙网络模拟程序求出了表征不连续面的网络图像, 进而计算出缓倾角结构面连通率和岩体的强度参数, 可以为类似工程提供参考和借鉴。

1 基于蒙特卡洛模拟计算连通率方法

蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法是一种常用的模拟技术, 鉴于蒙特卡洛方法的概率理论背景, 通常被用于随机变量和随机现象的研究。结构面的几何参数及产状的分布规律通常呈现出概率特征, 因此为了研究实际节理岩体的力学性质, 在岩体结构面网络图模拟中采用随机抽样方法, 以获取更接近实际的节理岩体结构面的形态。在实

际工程中,多次随机抽样法通常被用来模拟节理岩体结构面的实际形态。在结构面网络图模拟过程中,结构面产状(倾角、倾向)和几何参数(迹长、间距和结构面的宽度)常被用于结构面的描述。上述结构面参数通常符合一定的概率分布形式,能够被视为随机数。因此在岩体结构网络图模拟中往往需要产生各种分布形式的随机数以实现这些概率分布形式。

结构面网络图的基本假设为:①结构面网络图中生成的二维模拟区域为矩形,由方向角值、中点坐标值及迹长值来确定二维节理岩体结构面的唯一位置;②结构面迹线中点在给定区域内呈均匀分布,即中点出现的概率在模拟区域内可视作相等,因此中点坐标(x, y)平均生成;③由所需分布形式生成结构面迹长、倾向、倾角;④由倾向和倾角计算结构面方向角;⑤按随机数生成顺序,中点坐标、迹长、倾向及倾角随机数对应相应顺序的特定结构面。

结构面网络图的生成步骤为:①输入模拟所需的参数值;②按假设条数进行试算,迭代结束后区域内结构面计算总条数将趋于稳定,得到区域内每组结构面条数;③第 n 组结构面的第 c 条迹线在模拟区域内产生;④重复步骤②—③,直至生成完第 n 组结构面中包含的全部节理面;⑤重复步骤②—④,生成所有组的节理面,即完成此次结构面网络图样本的模拟计算;⑥重复步骤②—⑤,可以生成新的结构面网络图样本。网络模拟流程图如图1所示。

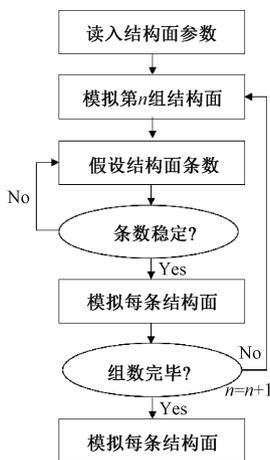


图1 网络模拟流程图

Fig. 1 Network simulation flow chart

结构面连通率在评估工程岩体的稳定性方面起着重要作用,一直是岩土工程领域的热点研究问题。

目前,通过结合蒙特卡洛方法来计算连通率是应用最为广泛且经济效益最高的途径之一。其中,常用的两种方法是带宽投影法和路径搜索法。

(1) 带宽投影法

由于岩体的综合抗剪强度参数与连通率直接相关,故连通率又可定义为:岩体沿某一剪切方向发生剪切破坏所形成的破坏路径中节理面所占的比例,公式如下:

$$K_d = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR} \quad (1)$$

公式中, K_d 为基于带宽投影法求出的一维岩体连通率, $\sum RBR$ 和 $\sum JL$ 分别代表剪切路径上岩桥和结构面的长度。

带宽投影法的优势在于能够较好地模拟岩体结构面极为复杂的分布情况,其劣势在于,该方法是建立在剪切方向假设之上,且计算结果为一维连通率,不能准确描述裂隙在三维空间中的连通情况,因此在实际工程应用中会受到一定限制。

(2) 路径搜索法

根据岩石强度理论,在结构面网络模拟成果图中搜索岩石发生剪切破坏时所形成的破坏路径中结构面所占的比例即为连通率。计算公式如下(本程序采用路径搜索法):

$$K_1 = \frac{\sum TL}{L} = \left(\frac{TL_A + TL_B + TL_C + TL_D}{L} \right) \quad (2)$$

公式中, K_1 为基于路径搜索法求出的连通率, $\sum TL$ 为剪切方向结构面的投影总长度, L 为剪切方向总长度, TL_A 、 TL_B 、 TL_C 和 TL_D 分别代表A、B、C、D等结构面有效段投影在剪切方向的长度。

2 岩体强度参数的计算

利用路径搜索法计算得出一定范围内的连通率为某一直线(剪切方向)的连通率。据此,可以利用此剪切方向上岩桥与结构面各自所占的比例进行节理岩体综合抗剪强度参数的计算,如下式所示:

$$f = a \times f_r + b \times f_j \quad (3)$$

$$C = a \times C_R + b \times C_J \quad (4)$$

公式中, b 和 a 分别代表结构面与岩桥在各自剪切方向上所占的比例; C_J 和 C_R 分别代表结构面与岩桥的黏聚力; f_j 和 f_r 分别代表结构面与岩桥的摩擦系数。

在计算连通率中受到各向异性的影响, 其计算结果同样体现出各向异性, 值得注意的是节理岩体强度参数大小变化趋势与连通率的大小变化趋势相反。因此强度参数最大时为连通率最小的方向, 而在连通率最大的方向, 强度参数则最小。这与结构面对岩体各个方向上的力学性质影响差异是相对应的, 更进一步验证了文中提出方法的可行性和可靠性。

3 西南某水电站岩体缓倾结构面连通率计算

3.1 西南某水电站缓倾结构面发育特征

现场对所有勘探平洞开展了结构面精测, 并据此评价了各平洞缓倾角结构面的连通率, 对该水电站左、右岸各个平洞中缓倾角结构面迹长、倾角、倾向和间距分别进行统计分析, 同时根据优势方位角将缓倾角结构面划分为 3 组, 分别为: ①北西西向组、②北西向组、③北东向组。

以平洞 PD02 为例, 共统计缓倾角结构面 123 条, 缓倾角裂隙发育特征如图 2 和表 1 所示。缓倾

表 1 PD02 缓倾角结构面分组统计表

Table 1 Statistical table of three groups of gently dipping structural planes at PD02

组别	产状			优势方位	裂隙条数	百分比/ %
	走向/ (°)	倾向	倾角/ (°)			
①NWW 组	270°~295°	NE 为主	10°~30°	NWW285°NE∠26°	54	43.90
②NW 组	295°~325°	NE 为主, 少量 SW	12°~28°	NW306°NE∠21°	25	20.33
③NE 组	18°~75°	NW 为主	3°~13°	NE47°NW∠11°	20	16.26

3.2 缓倾结构面网络模拟

根据测量结果, 平洞 PD02 的缓倾角结构面几

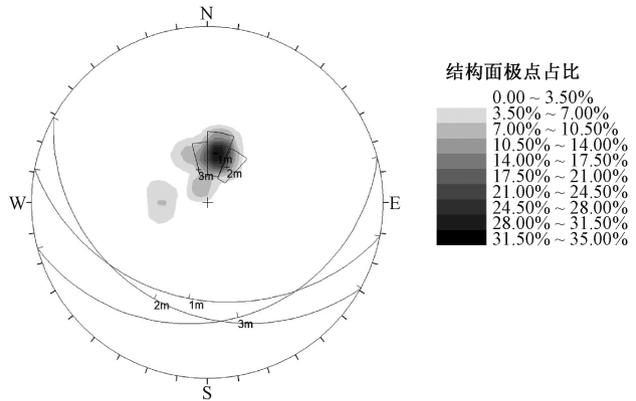
表 2 缓倾角结构面几何特征参数

Table 2 Geometric characteristic parameters of three groups of gently dipping structural planes

平洞编号	结构面组号	几何特征	概率分布模型	平均值	标准差
PD02	①	间距/m	负指数分布	2.28	1.86
		倾向/ (°)	正态分布	9.2	4.97
		倾角/ (°)	正态分布	29.9	5.60
		迹长/m	对数正态分布	1.08	0.88
	②	间距/m	对数正态分布	2.25	2.97
		倾向/ (°)	正态分布	28.0	9.47
		倾角/ (°)	正态分布	26.6	5.00
		迹长/m	对数正态分布	1.01	0.67
	③	间距/m	对数正态分布	10.99	6.50
		倾向/ (°)	正态分布	352.4	4.38
		倾角/ (°)	正态分布	27.6	5.64
		迹长/m	对数正态分布	1.04	0.58

岩桥和结构面的参数根据现场试验及工程地质类比法进行选取, 岩桥: 黏聚力 $C = 1.2$ MPa,

角结构面优势方位以①北西西向组为主、所占比例为 43.90%; ②北西向组次之, 所占比例为 20.33%; ③北东向组最少, 所占比例为 16.26%。



1m—①北西西向组结构面; 2m—②北西向组结构面; 3m—③北东向组结构面

图 2 右岸 PD02 缓倾结构面极点等密图

Fig. 2 Isodensity map of the gentle dip structural plane poles of PD02 in the right bank

1m-NWW-striking structural plane; 2m-NW-striking structural plane; 3m-NE-striking structural plane

何特征参数、缓倾角结构面概率分布以及残差图如表 2 和图 3 所示。

摩擦系数 $f = 1.2$, 抗拉强度 $R_t = 5$ MPa; 结构面: 黏聚力 $C = 0.05$ MPa, 摩擦系数 $f = 0.6$ 。根据在现

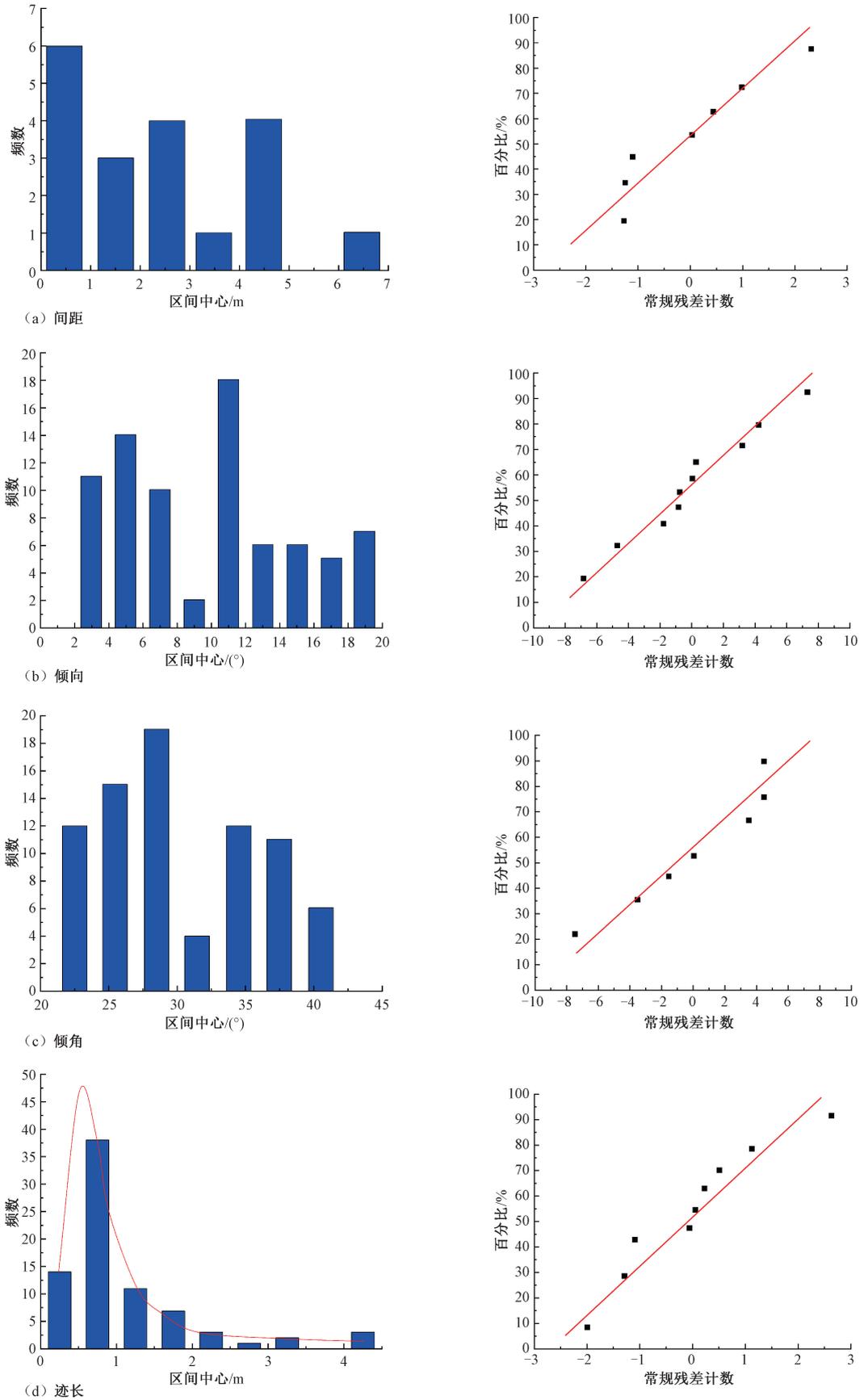


图 3 平洞 PD02 第①组缓倾角结构面概率分布及残差图

Fig. 3 Probability distribution graph and residual graph of Group ① gently dipping structural planes at PD02

场测得的缓倾角结构面间距、迹长、倾角和倾向等数据, 利用自行开发的裂隙网络模拟程序, 应用蒙特卡洛随机模拟的方法, 求出了表征不连续面的网络图像, 以计算缓倾角结构面连通率和岩体的强度参数。网络模拟结果如表 3 和图 4 所示。

从表 2 和图 4 的模拟结果中可以看出, 岩体连通率在不同剪切方向上是存在差异的。通过不同

方向的角度旋转, 总体获得的裂隙连通率较低, 该水电站平洞 PD02 缓倾角结构面裂隙连通率约为 27.35% 左右。采用常规方法, 对 PD02 平洞洞壁缓倾角结构面进行水平投影 (图 5), 获取平洞洞向方向的连通率, 量值为 26.97%, 网络模拟方法获取的连通率与常规方法和实测数据所获得的结果一致, 说明文中提出的方法具有较好的可靠性。

表 3 PD02 缓倾角结构面网络模拟结果

Table 3 Network simulation results of the gently dipping structural planes at PD02

旋转角度/ (°)	连通率/ %	摩擦系数	内聚力/ MPa	旋转角度/ (°)	连通率/ %	摩擦系数	内聚力/ MPa
0	0	1.2	1.2	90	17.88	1.09	0.99
10	0	1.2	1.2	100	0	1.2	1.2
20	0	1.2	1.2	110	0	1.2	1.2
30	0	1.2	1.2	120	0	1.2	1.2
40	0	1.2	1.2	130	0	1.2	1.2
50	0	1.2	1.2	140	0	1.2	1.2
60	6.20	1.16	1.13	150	0	1.2	1.2
70	40.15	0.96	0.74	160	0	1.2	1.2
80	45.17	0.93	0.68	170	0	1.2	1.2
缓倾方向平均值	连通率/%	27.35	摩擦系数	1.04	内聚力/MPa	0.89	

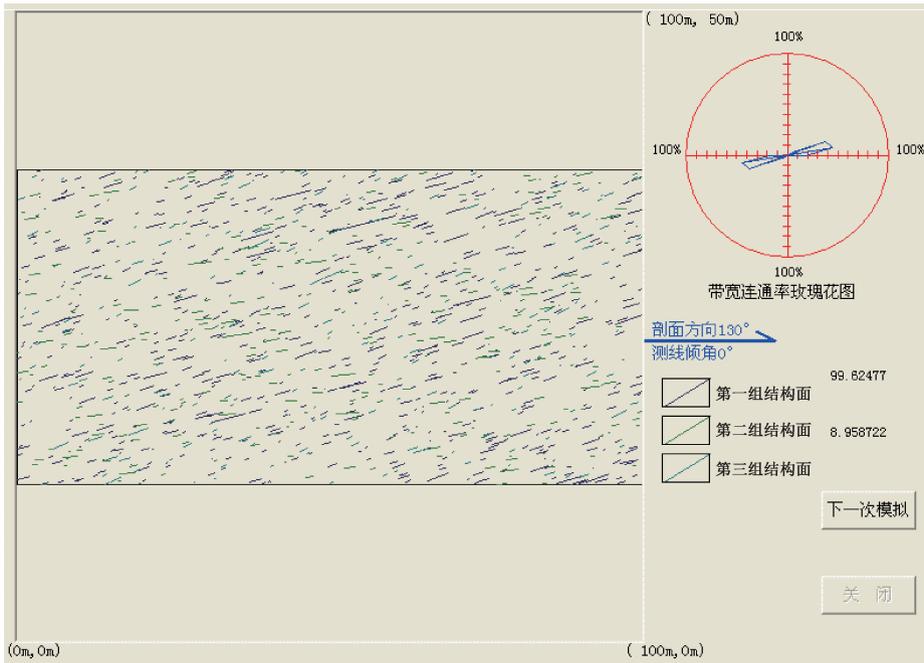


图 4 PD02 缓倾角结构面网络模拟结果

Fig. 4 Network simulation results of the gently dipping structural planes at PD02

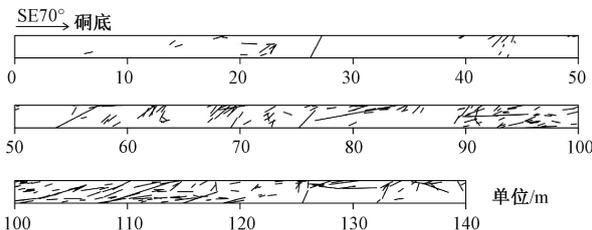


图 5 PD02 缓倾角结构面展布图

Fig. 5 Outline of the gently dipping planes at PD02

4 结论

文中根据在现场测得的缓倾角结构面间距、倾向、倾角和迹长等数据, 利用自行开发的裂隙网络模拟程序, 应用蒙特卡洛随机模拟的方法, 在计算机上求得表征不连续面的网络图像, 以计算缓倾角结构面连通率和岩体的强度参数。主要

结论如下:

(1) 水电站左、右岸岩体在不同剪切方向上的连通率是不同的, 通过不同方向的角度旋转, 总体获得的结构面连通率较低;

(2) 水电站右岸平洞 PD02 处缓倾角结构面的裂隙连通率约在 27.35% 左右, 摩擦系数为 1.04, 黏聚力为 0.89 MPa。

文中开发的程序和模拟方法与常规方法进行了比较和验证, 结果一致, 并已在该水电工程中应用, 可以为类似工程提供参考和借鉴。

References

- CHEN G Q, WANG J C, WANG W, et al., 2017. Failure characteristics of rock mass with intermittent joints of different connecting rates under direct shear test [J]. *Journal of Engineering Geology*, 25 (2): 322-329. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X, LIAO Z H, LI D J, 2011. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30 (4): 781-789. (in Chinese with English abstract)
- DERSKI W, IZBICKI R, KISIEL I, et al., 2012. *Rock and soil mechanics* [M]. Amsterdam: Elsevier.
- DU J C, CHEN Z Y, WANG X G, 2003. Application of optimizing methods in calculating persistence ratio and comprehensive shear strength of jointed rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22 (9): 1441-1447. (in Chinese with English abstract)
- EINSTEIN H H, VENEZIANO D, BAECHER G B, et al., 1983. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20 (5): 227-236.
- FAN L M, HUANG R Q, 2003. Probability model for estimating connectivity rate of discontinuities and its engineering application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22 (5): 723-727. (in Chinese with English abstract)
- GAO M Z, JIN W C, ZHENG C J, et al., 2012. Real-time evolution and connectivity of mined crack network [J]. *Journal of China Coal Society*, 37 (9): 1535-1540. (in Chinese with English abstract)
- HU Y F, ZHANG Y, JIN X G, 2011. Statistics of gentle angle rigid structural plane persistence ratio [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 38 (4): 78-81. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, FAN L M, 2003. Study on probability model of connectivity rate on nonuniform random discontinuities [J]. *Progress in Natural Science*, 13 (6): 621-625. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI M C, HAN S, ZHOU S B, et al., 2018. An improved computing method for 3D mechanical connectivity rates based on a polyhedral simulation model of discrete fracture network in rock masses [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51 (6): 1789-1800.
- LI Z, WU Z H, WANG J M, et al., 2021. Using EH4 audio-magnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojia paleo-landslide and its structural characteristics [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (2): 317-325. (in Chinese with English abstract)
- LIU C P, HAO W Z, WANG J L, et al., 2014. Effect of connectivity rate of dominant joints extending outward of the slope on high slope stability [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31 (12): 74-77. (in Chinese with English abstract)
- LIU X, JIN Y, LIN B T, et al., 2021. An integrated 3D fracture network reconstruction method based on microseismic events [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95 (2): 104182.
- QIU Z Q, GAO M Z, LYU Y C, et al., 2016. New calculation method for drilling three-dimensional connectivity rate and its engineering application [J]. *Safety in Coal Mines*, 47 (10): 44-47. (in Chinese with English abstract)
- SHI L, LI X C, BAI B, et al., 2012. Research on open-pit platform slope stability under rainfall condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33 (5): 1519-1526. (in Chinese with English abstract)
- SUN P, WANG Y J, ZHAO Y F, 2020. Analysis on anti-sliding stability of gravity dam under consideration of anisotropic shear strength of dam foundation rock mass [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51 (4): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- WANG H, CAO H, WAN C C, et al., 2014. A new method to predict the joint connectivity rate in deep rock masses based on drill data [J]. *China Mining Magazine*, 23 (S1): 165-168. (in Chinese with English abstract)
- WANG L H, BAI J L, SUN X S, et al., 2015. The triaxial loading and unloading mechanical properties of jointed rock masses with different joint connectivities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (12): 2500-2508. (in Chinese with English abstract)
- WANG L H, BAI J L, SUN X S, et al., 2015. The triaxial loading and unloading mechanical properties of jointed rock masses with different joint connectivities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (12): 2500-2508. (in Chinese with English abstract)
- WANG X G, JIA Z X, CHEN Z Y, 1998. An application of discontinuities network modeling principal to research of discontinuities connection ratio of jointed rock mass [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 29 (10): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- WANG X M, HUANG X Q, XIA L, et al., 2013. Characteristics of three-dimensional fracture persistence of abutment rock mass in Wudongde dam area [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38 (3): 655-662. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- WU Q, TANG H M, WANG L Q, et al., 2008. Three-dimensional connectivity rate and shear strength parameters calculation based on a new modified method of mean trace length [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (S2): 3941-3949. (in Chinese with English abstract)
- XU C, DOWD P A, MARDIA K V, et al., 2006. A connectivity index for discrete fracture networks [J]. Mathematical Geology, 38 (5): 611-634.
- YAN M, ZHANG B B, LI J L, et al., 2021. Research on influence of pore structure connectivity of low gas permeability on coal seam permeability [J]. Safety in Coal Mines, 52 (4): 31-38. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z P, JIANG Y W, LI B, et al., 2020. Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 459-470. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H N, XU X Y, ZHENG Y, et al., 2022. Experimental and numerical study of the mechanism of block-flexure toppling failure in rock slopes [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81 (1): 63.
- ZHOU H F, RAN T, CHEN B, et al., 2021. Failure modes and influence of interlaminar fracture zone connectivity on slope stability of bedding rock slope in Ya'an, West Sichuan [J]. Geoscience, 35 (1): 137-144. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Y, ZHANG H J, WU S C, et al., 2015. Meso-research on mechanical properties of rock mass affected by joint connectivity rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 36 (S2): 29-36. (in Chinese with English abstract)
- ZHU R C, 2015. Study on complex water stability of third series sandstone of Beihuan tunnel [J]. Railway Investigation and Surveying, 41 (6): 41-44. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈国庆, 王剑超, 王伟, 等, 2017. 不同连通率断续节理岩体直剪破坏特征 [J]. 工程地质学报, 25 (2): 322-329.
- 陈新, 廖志红, 李德建, 2011. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 30 (4): 781-789.
- 杜景灿, 陈祖煜, 汪小刚, 2003. 寻优方法在岩体结构面连通特性和综合抗剪强度研究中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 22 (9): 1441-1447.
- 范留明, 黄润秋, 2003. 岩体结构面连通率估计的概率模型及其工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 22 (5): 723-727.
- 高明忠, 金文城, 郑长江, 等, 2012. 采动裂隙网络实时演化及连通

- 性特征 [J]. 煤炭学报, 37 (9): 1535-1540.
- 胡耀飞, 张勇, 靳晓光, 2011. 基于现场实测的缓倾硬性结构面连通率统计 [J]. 水文地质工程地质, 38 (4): 78-81.
- 黄润秋, 范留明, 2003. 非均匀分布随机结构面连通率的概率模型研究 [J]. 自然科学进展, 13 (6): 621-625.
- 李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 191-202.
- 李忠, 吴中海, 汪金明, 等, 2021. 利用EH4音频大地电磁测深仪探测巧家巨型古滑坡及其结构面特征 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 317-325.
- 刘冲平, 郝文忠, 王吉亮, 等, 2014. 顺坡向外倾优势裂隙连通率对高边坡稳定性影响分析 [J]. 长江科学院院报, 31 (12): 74-77.
- 邱治强, 高明忠, 吕有厂, 等, 2016. 钻孔三维连通率计算新方法及其工程应用 [J]. 煤矿安全, 47 (10): 44-47.
- 石露, 李小春, 白冰, 等, 2012. 降雨条件下露天平台边坡的稳定性研究 [J]. 岩土力学, 33 (5): 1519-1526.
- 孙平, 王玉杰, 赵宇飞, 2020. 考虑坝基岩体抗剪强度各向异性的重力坝抗滑稳定分析方法 [J]. 水利水电技术, 51 (4): 132-138.
- 王贺, 曹辉, 万串串, 等, 2014. 深埋岩体结构面连通率预测的钻孔数据法 [J]. 中国矿业, 23 (S1): 165-168.
- 王乐华, 柏俊磊, 孙旭耀, 等, 2015. 不同连通率节理岩体三轴加卸荷力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 34 (12): 2500-2508.
- 汪小刚, 贾志欣, 陈祖煜, 1998. 岩石结构面网络模拟原理在节理岩体连通率研究中的应用 [J]. 水利水电技术, 29 (10): 43-47.
- 王晓明, 黄孝泉, 夏露, 等, 2013. 乌东德坝区拱座岩体三维裂隙连通率特征 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 38 (3): 655-662.
- 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等, 2008. 基于平均迹长修正新方法的岩体三维连通率及抗剪强度参数计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 27 (S2): 3941-3949.
- 严敏, 张彬彬, 李锦良, 等, 2021. 低透气性煤孔隙结构连通率对煤层渗透性的影响规律研究 [J]. 煤矿安全, 52 (4): 31-38.
- 杨忠平, 蒋源文, 李滨, 等, 2020. 采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 459-470.
- 周洪福, 冉涛, 陈波, 等, 2021. 川西顺层斜坡破坏模式及层间弱面连通率对斜坡稳定性的影响 [J]. 现代地质, 35 (1): 137-144.
- 周喻, 张怀静, 吴顺川, 等, 2015. 节理连通率对岩体力学特性影响的细观研究 [J]. 岩石力学, 36 (S2): 29-36.
- 朱容辰, 2015. 北环隧道第三系砂岩复杂水稳特性研究 [J]. 铁道勘察, 41 (6): 41-44.