

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.014

算井子地段地表岩体结构面发育程度评价

魏翔¹, 芦安贵², 程汉列³, 游声刚¹

(1. 重庆工商大学废油资源化技术与装备工程研究中心, 重庆 400067;
2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 中海艾普油气测试(天津)有限公司, 天津 300457)

摘要:为了探讨结构面发育程度对高放废物地质处置库选址的影响,以甘肃北山算井子地段岩体为研究对象,通过调查地表岩体节理和断层几何特征,采用数理统计方法获得节理产状、密度、间距、迹长和断层产状、断裂带宽度和断层泥厚度等统计数据,提出多尺度结构面综合评价指标来评价岩体结构面发育程度。结果表明:BS22 和 BS23 钻孔周围分别发育 4 个和 5 个节理优势组,节理产状服从正态分布;BS22 和 BS23 钻孔周围岩体节理平均中点面密度分别为 0.037 m^{-2} 和 0.035 m^{-2} ,平均迹长分别为 20.38 m 和 17.39 m;解译出断层 F1 产状为 $35^{\circ}\angle 85^{\circ}$,延伸长度为 4.49 km;BS22 钻孔周围岩体结构面发育程度更低,更适合作为我国高放废物处置库建造场址。

关键词:地表岩体;结构面几何特征;结构面发育程度;高放废物地质处置;算井子地段

中图分类号:P583;TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)01-0096-06

Evaluation of structural plane development for surface rock mass in Suanjingzi area

WEI Xiang¹, LU Angui², CHENG Hanlie³, YOU Shenggang¹

(1. Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
2. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;
3. COSL-EXPRO Testing Services (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: To discuss the influence of the development degree of structural plane on the location selection of high-level radioactive waste repository, the rock mass of Suanjingzi area in Beishan, Gansu Province, was taken as the research object, and the statistical characteristics, such as the joint occurrence, density, spacing, trace length, fault occurrence, width of fault zone and thickness of fault gouge, were obtained through the mathematical statistics based on the geometric characteristic investigation of joints and faults in the superficial rock mass. Then, a multi-scale structural surface comprehensive evaluation index was proposed to evaluate the structural plane development in the superficial rock mass. The results showed that there were 4 and 5 dominant joint groups around BS22 and BS23 boreholes, and joints obeyed the normal distribution. The midpoint surface densities of joint traces around BS22 and BS23 boreholes were 0.037 m^{-2} and 0.035 m^{-2} respectively, and the average trace lengths were 20.38 m and 17.39 m respectively. The fault F1 was interpreted as $35^{\circ}\angle 85^{\circ}$, with an extension length of 4.49 km. The structural plane of rock mass around the BS22 drill hole was less developed and more suitable for the construction site of high-level radioactive waste repository than the BS22 borehole.

Key words: superficial rock mass; geometric characteristics of structural plane; development degree of structural plane; high-level radioactive waste repository; Suanjingzi area

高放废物地质处置作为特殊的地下工程,采用多重屏障系统,构建玻璃固化-废物储存罐-膨润土的工程屏障和高放废物地质处置围岩的天然屏障。由于高放废物中的放射性核素毒性大、半衰期长,地质处置库的安全评价期限至少要达到 1 万 a^[1],而工程屏障在百年后失效,最终高放废物的隔离将依靠围岩。

花岗岩由于具有低渗透、高强度、抗辐射、阻核素等特点,已成为我国高放废物地质处置首选围岩。但是

基金项目: 重庆市科技局自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmx0743);重庆市科技局自然科学基金博士后项目(cstc2020jcyj-bshx0096);重庆工商大学高层次人才科研启动项目(1856045)

作者简介: 魏翔(1989—),男,讲师,博士,主要从事核废物地质处置研究。E-mail:weixiang19890602@outlook.com

引用本文: 魏翔,芦安贵,程汉列,等.算井子地段地表岩体结构面发育程度评价[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):96-101.
WEI Xiang, LU Angui, CHENG Hanlie, et al. Evaluation of structural plane development for surface rock mass in Suanjingzi area [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(1): 96-101.

花岗岩体是由结构面和岩石组成的,这些结构面形成的网络通道构成放射性核素伴随地下水向生物圈扩散的媒介,威胁到处置库安全。因此研究地表岩体结构面几何特征及其发育程度对高放废物地质处置工程具有重要意义^[2]。

国内外学者已对结构面几何特征开展了大量研究,并于 1978 年由国际岩石力学学会提出采用产状、间距(密度)、迹长、隙宽等 10 个指标来描述岩体结构面几何特征^[3]。在结构面产状方面,Schmidt^[4]提出了施密特图方法来统计结构面产状优势组及其分布规律;Shanley 等^[5]基于聚类论开发了聚类分析程序来划分结构面产状优势组;田开铭等^[6]研究发现结构面产状服从 Fisher 分布。在结构面迹长方面,Priest 等^[7]提出采用测线法来统计地表结构面迹长,并通过测线与结构面空间分布关系来确定结构面迹长大小;汪进超等^[8]研究了基于钻孔摄像技术调查的结构面迹长及其统计方法;Zhang 等^[9]基于采样偏差校正理论,采用圆形取样窗口来估算节理迹长。在结构面间距(密度)方面,Mauldon^[10]提出了圆形窗口法来估算结构面密度;Kulatilake 等^[11]通过假定迹长分布服从负指数分布来统计结构面中点位置,并计算获取结构面中点面密度;杨春和等^[12]采用了圆形取样窗口法来统计结构面迹长和中点面密度。

在研究结构面几何特征的基础上,国内外学者也提出了多种岩体结构面发育程度评价指标。1964 年 Deere^[13]提出了岩石质量指标来评价钻孔岩体结构面发育程度;Bieniawski^[14]提出了岩体分类指标评价岩体工程质量指标,并利用岩石质量指标和结构面间距两个参数来表示岩体结构面发育程度;Barton 等^[15]提出了岩体工程质量的定量化分类系统,并采用岩石质量指标与节理组数的比值来定量描述岩体结构面发育程度。

目前岩体结构面发育程度评价指标都是以统计尺度结构面(即节理型结构面)为主,但是对于高放废物地质处置工程来说,工程尺度结构面(即断层型结构面)对处置围岩的安全性和稳定性已有一定的影响。基于这一问题,本文以甘肃北山算井子地段 BS22、BS23 号钻孔周边岩体为研究对象,在调查和统计结构面几何特征的基础上,提出了多尺度结构面综合评价指标(multi-scale structural surface comprehensive evaluation index)来评价地表岩体结构面的发育程度,以期为高放废物处置库选址提供参考。

1 区域地质特征及结构面调查

算井子地段为我国高放废物处置库甘肃北山预选区的有利候选地段^[1],位于甘肃省嘉峪关西北 200 km 处,属北山山系的马鬃山区,山峰海拔平均高差在 100~200 m 之间,属中低山地形。该地区属于典型的大陆性气候,干燥多风,年降水量小于 60 mm,蒸发量则高达 3039 mm,植被不发育;常年干旱缺水,无常年流水,仅在暴雨之后有暂时性洪水。区内居民稀少,多为不定居的蒙古族牧民。这些都是算井子地段作为高放废物地质处置库场址的有利地质、水文和环境条件。

算井子地段地表岩体地质调查发现,区内发育有节理型和断层型结构面。节理延展性差,无论在走向上还是纵深方向上的发展均是有限的,一般在数米至数十米之间,无明显填充物,如图 1 所示。断层延伸数千米,连续性好,具有一定的厚度与方向,如图 2 所示。这些结构面的存在破坏了岩体的完整性,也影响岩体力学和渗流特性,是高放废物地质处置工程的不利因素。



图 1 算井子地段节理发育情况

Fig. 1 Joint development in Suanjingzi area



图 2 断层发育情况

Fig. 2 Fault development

本文调查范围为 BS22、BS23 钻孔周边岩体 4 km² 范围内的节理以及发育的断层(图 3)。采用测线法对地表露头进行详细、准确的现场测量,基于测线应尽可能与所有节理相交的原则,调查统计节理产状、迹长和位置等几何特征。采用解译法对遥感图像解译,并利用 GPS 定位工具,调查统计断层延伸长度、产状、断裂

带宽度以及断层泥形态等几何特征。通过调查结构面几何特征来评价地表岩体结构面发育程度。

2 结构面几何特征统计

2.1 节理几何特征统计

节理是岩石在特定的地质环境和构造应力场作用下的产物。在高放废物地质处置工程中,主要开展节理产状、间距、迹长的调查。针对节理产状的统计,利用 Dips 软件获得节理产状玫瑰花图和极点等密度图。图 4 给出了 BS22 钻孔周围岩体节理产状分布,可以看出 BS22 钻孔周围地表岩体主要有 4 组节理。根据节理产状玫瑰花图和极点等密度图,得出 BS22、BS23 钻孔周围岩体节理优势产状如表 1 所示。

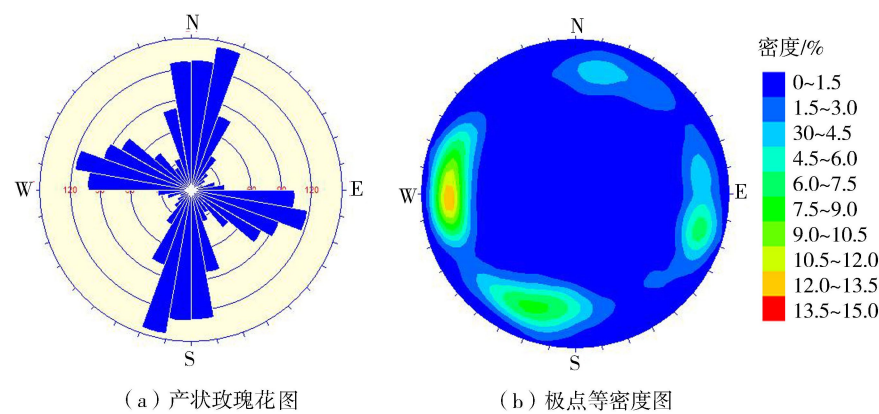


图 4 BS22 钻孔周围岩体节理产状分布
Fig. 4 Distribution of joint occurrence around BS22 borehole

在获得节理优势组基础上,统计节理产状频率分布,并绘制直方图,从而得出不同产状节理数量分布的拟合曲线及概率密度分布函数。图 5 为 BS23 钻孔 180.0°∠79.1°优势组产状直方图、拟合曲线和拟合公式,可以看出节理产状服从正态分布。通过统计学方法可得到 BS22 和 BS23 钻孔周围岩体所有节理优势产状的拟合参数,结果如表 2 所示。

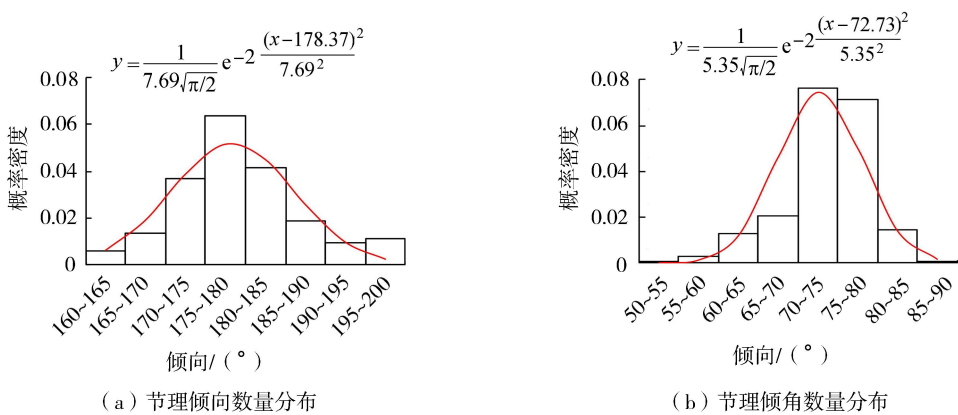


图 5 BS23 钻孔 180.0°∠79.1°优势产状直方图、拟合曲线和拟合公式
Fig. 5 Histogram, fitting curve and formula of occurrence for dominant set 180.0°∠79.1°

节理密度和迹长的统计通常采用圆形取样窗口法^[8]。本文根据测线法调查的节理位置数据,通过 MATLAB 编程,采用圆形窗口法统计节理迹长和中点面密度,分析圆形窗口不同直径和不同圆心位置下的节理迹长和中点面密度变化规律^[16]。节理迹长和中点面密度计算公式为

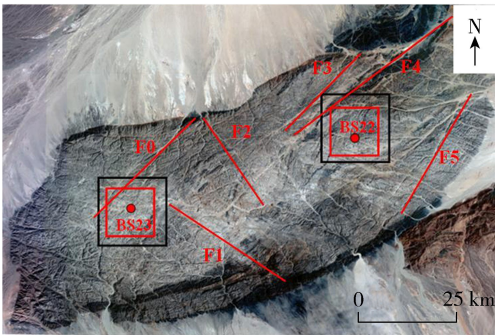


图 3 算井子地段结构面调查范围
Fig. 3 Investigation scope of structural plane in Suanjingzi area

表 1 BS22 和 BS23 钻孔节理优势组产状

Table 1 Dominant joint sets for BS22 and BS23 boreholes			
钻孔	优势组	节理产状/(°)	
		倾向	倾角
BS22	1	35.5	74.9
	2	119.7	73.8
	3	215.5	71.9
	4	302.4	70.1
BS23	1	48.7	75.0
	2	124.6	68.4
	3	180.0	79.1
	4	249.6	76.4
	5	307.8	72.7

$$\nu = \frac{\pi(N + N_0 - N_2)c}{2(N - N_0 + N_2)} \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{N - N_0 + N_2}{2\pi c^2} \tag{2}$$

式中: ν 为节理迹长, m; λ 为节理中点面密度, m^{-2} ; c 为圆形窗口半径, m; N_0 、 N_1 、 N_2 、 N 分别为贯穿型、相交型、包容型节理数量和节理总数量, 条。根据式(1)和式(2)计算得出 BS22、BS23 钻孔周围节理平均迹长分别为 20.38 m 和 17.39 m, 平均中点面密度分别为 0.037 m^{-2} 和 0.035 m^{-2} 。

2.2 断层几何特征统计

根据算井子地段岩体遥感图(图 3),利用图像解译法可以初步统计出断层延伸长度和断层走向。以断层 F1 为例,由图 4 和区域应力场分布情况,可以得出断层 F1 呈北西—南东向分布,分布方向与最大主应力轴方向垂直,为压剪型逆断层。断层 F1 北西端开挖施工探槽(图 6),根据图 6 中探槽壁上断层泥和碎粒岩特征得出断层走向 125° ,断层面产状 $26^\circ \angle 85^\circ$,断层泥宽约 15 cm。通过 GPS 工具定位断层起始点,将地理坐标(经纬度)转换为平面坐标(x_1, y_1)和(x_2, y_2)计算出断层的延伸长度 L :

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{3}$$

由式(3)可计算得出断层 F1 延伸长度为 4.49 km。



图 6 断层 F1 施工探槽

Fig.6 Exploratory trench of fault F1

3 结构面发育程度评价

结构面是地壳浅层中广泛发育的断裂构造,会影响工程岩体稳定性和安全性。影响岩体结构面发育程度的因素很多,目前岩石质量指标、结构面间距、结构面密度是描述岩体结构面发育程度的主要指标,建立适合我国高放废物地质处置工程的结构面发育程度评价体系具有重大的工程价值。

3.1 多尺度结构面综合评价指标

我国高放废物地质处置工程遵循处置库选址、场址评价、地下试验室和处置库建设“三步曲”式的实施方案^[17],从 1986 年起开始进行处置库选址工作并分全国筛选、地区筛选、地段筛选、确定处置库建造场址 4 个阶段进行。本文主要是针对地段筛选阶段,通过研究地表岩体结构面(主要是断层和节理)发育程度评价来比选处置库场址。在综合考虑我国处置库建设所处的阶段和结构面几何特征统计数据的基础上,提出多尺度结构面综合评价指标来分析地表岩体结构面发育程度,计算公式如下:

$$M = F_{Li}F_{Wi} + F_{JSR} = F_{Li}F_{Wi} + F_{Nj}F_{\lambda j}F_{\nu j} \tag{4}$$

式中: M 为多尺度结构面综合评价指标值; F_{Li} 为断层 i 延伸长度对应的评分值; F_{Wi} 为断层 i 的断裂带宽对应的评分值; F_{JSR} 为节理发育程度评价指标值; F_{Nj} 为钻孔 j 周围地表岩体的节理组数对应的评分值; $F_{\lambda j}$ 为钻孔 j

周围地表岩体的节理平均中点面密度对应的评分值; F_{vj} 为钻孔 j 周围地表岩体节理平均迹长对应的评分值。表3给出了结构面几何特征对应的评分值,由式(4)计算得出不同 M 值对应的岩体结构面发育程度如表4所示。

表3 结构面几何特征对应的评分值
Table 3 Score value for each geometric feature of structural plane

L/km	F_{Li}	W/m	F_{Wi}	$N/\text{组}$	F_{Nj}	λ/m^{-2}	$F_{\lambda j}$	v/m	F_{vj}
<1	[0,4)	<1	[0,1)	0 或 1	[0,0.8)	[0,0.2)	[0,1)	[0,1)	[0,1)
[1,5)	[4,8)	[1,5)	[1,2)	2	[0.8,1.6)	[0.2,0.6)	[1,2)	[1,3)	[1,2)
[5,10)	[8,12)	[5,10)	[2,3)	3	[1.6,2.4)	[0.6,2)	[2,3)	[3,10)	[2,3)
[10,20)	[12,16)	[10,20)	[3,4)	4	[2.4,3.2)	[2,6)	[3,4)	[10,20)	[3,4)
≥ 20	[16,20]	≥ 20	[4,5]	≥ 5	[3.2,4.0]	≥ 6	[4,5]	≥ 20	[4,5]

3.2 评价结果

根据统计的 BS22、BS23 钻孔周边岩体 4 km²范围内的节理及发育的断层几何特征,按照断层与钻孔的相对位置,将断层 F0 和 F1 划为 BS22 钻孔周围地表岩体,断层 F3 和 F4 划为 BS23 钻孔周围地表岩体,由式(4)可计算得出 BS22 和 BS23 钻孔地表岩体的 M 值分别为 16.05 和 23.10,分别属于 I 级和 II 级,可见 BS22 钻孔周围地表岩体结构面发育程度比 BS23 钻孔低,更适合作为高放废物处置库建造场址。

表4 岩体结构面发育程度评价等级

Table 4 Evaluation grading of development degree for the structural plane of rock mass

等级	M	结构面发育程度
I	[0,40)	低
II	[40,80)	较低
III	[80,120)	中等
IV	[120,160)	较高
V	[160,200]	高

4 结 论

a. BS22 和 BS23 钻孔周围分别发育 4 个和 5 个节理优势组,节理产状均服从正态分布;基于圆形窗口法,得出 BS22 和 BS23 钻孔周围岩体节理平均中点面密度分别为 0.037 m⁻²和 0.035 m⁻²,平均迹长分别为 20.38 m 和 17.39 m;通过图像解译法和形貌观察得出断层 F1 走向为 125°,断层面产状为 26°∠85°,断层泥宽约为 15 cm,延伸长度为 4.49 km。

b. 提出了多尺度结构面综合评价指标来进行地表岩体结构面评价,通过计算比较 BS22 和 BS23 钻孔周围地表岩体多尺度结构面综合评价指标值,得出 BS22 钻孔周围地表岩体结构面发育程度较低,更适合作为我国高放废物处置库建造场址。

参考文献:

[1] 王驹. 世界高放废物地质处置发展透析[J]. 中国核工业, 2015(12):36-39. (WANG Ju. Analysis of the development of geological disposal of high-level radioactive waste in the world [J]. China Nuclear Industry, 2015(12):36-39. (in Chinese))

[2] 魏翔,杨春和. 钻孔岩体裂隙几何参数确定方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9):1758-1766. (WEI Xiang, YANG Chunhe. A method of geometric parameter determination of drilling rock fractures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9):1758-1766. (in Chinese))

[3] ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 1978, 15(6):319-368.

[4] SCHMIDT W. Gefügestatistik [J]. Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 1925, 38:392-423.

[5] SHANLEY R J, MAHTAB M A. Delineation and analysis of clusters in orientation data [J]. Mathematical Geology, 1976, 8(1):9-23.

[6] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价 [M]. 北京:学苑出版社, 1989.

[7] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 1981, 18(3):183-197.

[8] 汪进超, 王川婴, 唐新建, 等. 基于钻孔摄像技术的岩体节理大小估算方法 [J]. 岩土力学, 2017, 38(9):2701-2707. (WANG Jinchao, WANG Chuanying, TANG Jianjian, et al. Estimation method of rock joint size based on borehole photography technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9):2701-2707. (in Chinese))

[9] ZHANG L, EINSTEIN H H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities [J]. Rock Mechanics and Rock

Engineering,1998,31(4):217-235.

[10] MAULDON M. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,1998,31(4):201-216.

[11] KULATILAKE P H S W, WU T H. The density of discontinuity traces in sampling windows[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1984,21(6):345-347.

[12] 杨春和,包宏涛,王贵宾,等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2475-2480. (YANG Chunhe,BAO Hongtao,WANG Guibin,et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(12):2475-2480. (in Chinese))

[13] DEERE D U. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. Rock Mechanics and Engineering Geology, 1964, 9(1):17-22.

[14] BIENIAWSKI Z. Engineering classifications of jointed rock masses[J]. The Civil Engineer in South Africa,1973, 15(12): 335-344.

[15] BARTON N R, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mechanics,1974,6(4):189-236.

[16] 王贵宾,杨春和,包宏涛,等. 岩体节理平均迹长估算[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2589-2592. (WANG Guibin, YANG Chunhe, BAO Hongtao, et al. Mean trace length estimation of rock mass joint [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(12):2589-2592. (in Chinese))

[17] 王驹,苏锐,陈伟明,等. 中国高放废物深地质处置[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(4):649-658. (WANG Ju, SU Rui, CHEN Weiming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(4):649-658. (in Chinese))

(收稿日期:2020-11-14 编辑:熊水斌)

(上接第 90 页)

[9] 蒋泽锋,朱大勇. 强降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场[J]. 岩土力学,2016,37(增刊2):25-34. (JIANG Zefeng, ZHU Dayong. Critical slip field of slope with tension crack under intensive rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(Sup2):25-34. (in Chinese))

[10] 王小兵,夏晓舟,章青. 基于正交试验和神经网络的堤防边坡抗滑稳定可靠度研究[J]. 长江科学院院报,2019,36(10):89-93. (WANG Xiaobing, XIA Xiaozhou, ZHANG Qing. Reliability analysis on anti-sliding stability of levee slope based on orthogonal test and neural network [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 89-93. (in Chinese))

[11] 邓东平,李亮. 渗流条件下具有张裂缝边坡的稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):294-302. (DENG Dongping, LI Liang. Stability analysis of slope with tensile crack under condition of seepage[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2013,44(1):294-302. (in Chinese))

[12] GAN Lei, CHEN Guanyun, SHEN Zhenzhong. A new approach to permeability inversion of fractured rock masses and its engineering application[J]. Water,2020,12(3):734.

[13] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范:SL274—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.

[14] 江沅,沈振中,邱乾勇. 三维非稳定饱和-非饱和渗流有限元法改进及验证[J]. 水电能源科学,2008,26(3):54-56. (JIANG Hang, SHEN Zhenzhong, QIU Qianrong. Improvement of finite element method and its validation in 3-D unstable saturated-unsaturated seepage[J]. Water Resources and Power,2008,26(3):54-56. (in Chinese))

[15] 王东,沈振中,陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):307-312. (WANG Dong, SHEN Zhenzhong, TAO Xiaohu. Three-dimensional finite element analysis and safety assessment for seepage field of a tailings dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2012,40(3):307-312. (in Chinese))

[16] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research,1986,22(13):1845-1856.

[17] 中华人民共和国水利部. 堤防工程设计规范:GB50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

(收稿日期:2020-08-22 编辑:胡新宇)