

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.018

膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征

曾志雄, 孔令伟, 田 海, 李聚昭

(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, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 膨胀岩是一种特殊软岩, 在干湿循环作用下容易崩解泥化。针对延吉膨胀岩, 开展干湿循环作用下膨胀岩浸水崩解试验, 研究其粒径变化规律。根据干湿循环后粒径分布, 引入标准基础熵表征膨胀岩崩解特性, 并与崩解比进行类比分析。研究表明: 各粒组含量在前 3 次干湿循环中变化较大, 第 3 次干湿循环后逐渐趋于稳定; 随着干湿循环次数的增加, 粗颗粒含量逐渐减少, 细颗粒含量增加, 土颗粒大小经历了由均匀到不均匀, 再到均匀的过程; 标准基础熵与崩解比存在明显的线性负相关关系, 标准基础熵随着崩解比的增大而减小, 表明利用标准基础熵表征颗粒分布规律是合理可行的; 随着干湿循环次数的增加, 标准基础熵先减小, 后逐渐稳定, 与级配曲线及其衍生指标变化规律相同, 再次验证该方法的可行性和适用性, 为膨胀岩的崩解破碎分析提供一种新的量化指标; 膨胀岩路堑边坡开挖以后, 应及时采取防水保湿措施, 防止发生崩解泥化现象。

关 键 词: 膨胀岩; 干湿循环; 崩解; 粒度熵; 崩解比

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017) 07—1983—07

Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization

ZENG Zhi-xiong, KONG Ling-wei, TIAN Hai, LI Ju-zhao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Swelling mudstone is one type of special soft rock with a feature of collapsing under drying and wetting cycles. Water immersion tests were conducted in laboratory to examine disintegration behavior of Yanji swelling mudstone under drying and wetting cycles. On the basis of grain size distributions, relative base entropy is proposed to measure the disintegration behavior, and is compared with disintegration ratio. The results show that the groups of different grain sizes change greatly at the initial 3 cycles, and then tend to be stable. With the increase of the number of wetting and drying cycles, the coarse particle content gradually decreases, the fine particle content increases. The particle size changes from the homogeneous to the heterogeneous state, then back to the homogeneous state. There is a significant negative linear relationship between relative base entropy and disintegration ratio. The relative base entropy decreases with the increase of disintegration ratio, implying reasonable and feasible measurement of the grain size distributions using proposed relative base entropy method. The relative base entropy decreases gradually with the increase of the number of drying and wetting cycles, and finally tends to be stable, which agrees well with the changes in the grain size distribution and its derived indexes. Hence, the feasibility and applicability of the proposed approach are verified again, and the relative base entropy can be a new useful index for the quantitative analysis of the disintegration of swelling mudstone. After the excavation of cutting slopes, waterproofing and moisturizing measures should be taken in time to prevent the disintegration and argillitization of swelling mudstone.

Keywords: swelling mudstone; drying and wetting cycles; disintegration; grading entropy; disintegration ratio

1 引 言

膨胀岩是指能与水发生物理化学反应, 易风化

和易软化的一类特殊软岩, 失水后吸水, 常常会产生不均匀膨胀, 发生泥化崩解现象^[1]。膨胀岩土在我国分布广泛, 一直是困扰我国岩土工程建设的难

收稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41430634); 岩土力学与工程国家重点实验室自主部署项目(No. Y11002)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41430634) and the State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (Y11002).

第一作者简介: 曾志雄, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事特殊土土力学与地基基础方面的研究工作。E-mail: zzhxhp@163.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

题,从南京红山窑水利枢纽到南水北调中线总干渠,从百色盆地云桂铁路工程到延吉盆地吉珲铁路客运专线,先后在 20 多个省、市和自治区发现有膨胀岩土分布。近些年来,随着我国基础设施建设的稳步推进,众多的交通、水利、矿山工程中都遇到了膨胀性软岩遇水崩解问题^[2-6]。针对膨胀性软岩的崩解机制以及定量描述,许多学者开展了大量的研究工作。刘长武等^[3]通过泥岩遇水崩解前、后微观结构和微孔隙的变化规律,分析了泥岩的崩解软化机制。吴道祥等^[4]通过室内崩解试验,得到了干湿循环过程红层软岩崩解物颗粒含量的变化规律,认为细粒的剥离及胶结物的溶解是红层软岩崩解的主要原因。赵明华等^[5],刘晓明等^[6]开展了湘南红砂岩的室内崩解和模拟大气条件下的崩解试验,引入分形方法模拟了红层软岩崩解后的粒径随时间的长期变化规律,建立了定量描述崩解过程的分形维数指标。然而,膨胀岩的崩解机制较为复杂,至今仍未形成一致的认识,一直没有找到统一的定量描述标准。

粒度熵是 Lörincz^[7]在其博士论文中提出的一种用两个粒度熵参数定量描述分布曲线的新方法。目前,粒度熵已经在土颗粒剪切破碎、土体孔隙孔径分布曲线和土-水特征曲线中得到了广泛应用^[8-11]。基于此,本文以延吉盆地黄褐色膨胀岩为研究对象,基于干湿循环后膨胀岩的颗粒级配曲线,尝试利用粒度熵理论定量描述膨胀岩崩解过程中的颗粒含量变化规律,研究干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性,建立粒度熵参数与崩解比的相关关系,得到粒度熵参数随干湿循环次数的变化规律。

2 试样与试验方法

2.1 试样的基本性质

试验样品为黄褐色强风化膨胀岩,取自吉林至珲春铁路客运专线 K279 处,深度为 2.0~4.0 m,取样现场照片如图 1 所示。岩体极破碎,节理裂隙发育,呈坚硬状,泥状结构。其矿物成分组成和基本物理性质如表 1、2 所示,试样黏土矿物含量为 28.2%,自由膨胀率为 54%,具有弱偏中等膨胀性。

取样地点位于延吉盆地东北部,属于温带半湿润大陆性季风气候,降雨主要集中在夏季,膨胀岩失水后浸水,经历着剧烈的干湿循环作用。岩块干燥后浸水,崩解过程如图 2 所示。岩块浸水后迅速吸水软化,表面产生裂隙并有气泡逸出,水变浑浊,60 min 后基本全部崩解,崩解物呈现为泥状,崩解过程非常剧烈。



图 1 黄褐色膨胀性泥岩

Fig.1 Yellow-brown swelling mudstone

表 1 膨胀性泥岩的矿物组成及含量(单位: %)

Table 1 Mineral composition and content of swelling mudstone (unit: %)

蒙脱石	伊利石	白云石	长石	石英
23.0	5.2	3.1	45.2	23.5

表 2 膨胀性泥岩的基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of swelling mudstone

天然含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	土体相对密度 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{d0}/(g/cm^3)$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	50 kPa 有荷膨胀率 $\delta_{50}/\%$	体缩率 $e_s/\%$	收缩系数 λ_n	缩限 $w_s/\%$
20.0	1.67	2.72	25.6	41.4	15.8	20.6	1.72	54	1.80	14.0	0.49	13.9

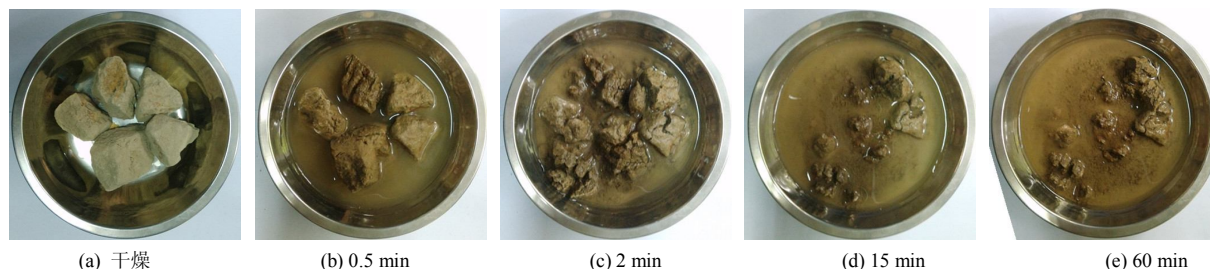


图 2 浸水崩解过程照片

Fig.2 Photos of disintegrating process in immersion

2.2 试验方法

为了研究延吉膨胀岩干湿循环过程中的崩解规

律,设计的室内崩解试验主要步骤如下:

(1) 采用四分法均匀选取大约 42 kg 天然岩样,

分为14份,分别装入14个敞口容器中,每份约3 kg,两份组成一组,共7组,分别用来进行初始状态(干筛)和0~5次干湿循环后的颗粒分析试验;

(2) 取出两份岩样置于105℃环境中持续干燥,直至岩样质量变化小于0.02 g/h,分别用40、20、10、5、2、1、0.5、0.25和0.075 mm的标准筛进行干筛,粒径在0.075 mm以下的颗粒采用甲种密度计法,得到初始状态的各粒组颗粒含量;

(3) 另取两份岩样,向容器内注入蒸馏水,浸泡48 h后,用标准筛进行水筛,筛分完成后取筛上的颗粒在105℃环境中烘干称重,分别记录各粒组的颗粒质量,0.075 mm的筛下悬液烘干后,采用甲种密度计法进行颗粒分析,得到0次干湿循环岩样浸水崩解后各粒组颗粒含量;

(4) 将剩余岩样置于105℃环境中持续干燥,直至岩样质量变化小于0.02 g/h,1次干燥过程结束,取出两份岩样进行步骤(3)的操作,得到1次干湿循环后岩样的颗粒粒径分布,并向剩余的岩样中注入蒸馏水浸泡48 h;

(5) 重复步骤(4),直至完成所有试样的颗粒分析试验。

3 试验结果

干湿循环作用下颗粒粒径变化主要可以归纳为两方面的原因:①岩块吸水饱和产生不均膨胀,大块破裂成小块;②粒径较大的团聚体在水化饱和和过程分散成小团聚体。粒组含量随干湿循环次数的变化如图3所示,岩样浸水饱和后颗粒的平均粒径较初始状态(干筛)明显减小,各粒组含量在前3次干湿循环中变化较大,第3次循环后逐渐趋于稳定。随着干湿循环次数的增加,粒径大于0.25 mm的颗粒急剧减少,最后几乎完全消失,而小于0.25 mm的颗粒含量总体呈现增加的趋势,5次干湿循环后增加了91.5%,尤其是粒径为0.01~0.05 mm的颗粒在后期占绝对优势,含量高达32.7%。除了最大和最小粒径组外,其他粒组含量变化来源于两部分:一方面大于该粒组的颗粒崩解进入该粒组;一方面原来在该粒组中的部分颗粒崩解离开该粒组^[12]。粒径小于0.075 mm的粒组含量变化主要由大颗粒崩解进入该粒组引起的,粒径大于0.25 mm的粒组以自身崩解为主。在前两次干湿循环过程中,大于0.25 mm颗粒崩解产生的0.075~0.250 mm粒径的颗粒比崩解离开该粒组的颗粒多,第3次干湿循环后,0.075~0.250 mm粒组自身崩解占优,因此,

0.075~0.250 mm颗粒含量随着干湿循环次数的增加呈现出先增加后减小,最后趋于稳定的变化趋势。5次干湿循环以后,大于0.25 mm颗粒含量较初始状态小,而小于0.25 mm颗粒含量较初始状态大,颗粒的崩解性随颗粒变小而减小,0.25 mm可以作为颗粒崩解性强弱的分界点^[4]。

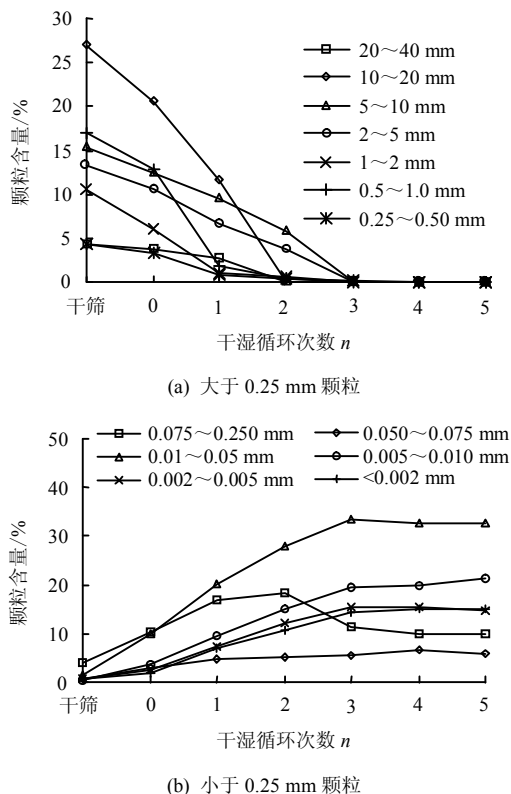


图3 干湿循环作用下颗粒含量变化
Fig.3 Changes of grain contents with drying and wetting cycles

为了进一步分析膨胀岩经过干湿循环后的颗粒特征,利用颗粒级配曲线及其衍生指标不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 来评价膨胀岩干湿循环后的均匀程度与颗粒分布(见图4、5)。由图4可知,随着干湿循环次数的增加,相邻两次干湿循环的级配曲线差别越来越小,表明粗颗粒逐渐崩解,各粒组含量趋于稳定。 C_u 反映了颗粒的不均匀程度, C_c 反映了粒径曲线的整体形状和细粒含量。由图5可知,随着干湿循环次数的增加, C_u 先增加后减小,最后逐渐趋于稳定, C_c 则呈上升趋势。这是因为随着干湿循环次数的增加,均匀的大颗粒崩解成小颗粒,细粒含量增加, C_u 和 C_c 增加,随着大颗粒的进一步崩解,细颗粒占绝对优势,颗粒变得均匀, C_u 减小,土颗粒大小经历了一个由均匀到不均匀,再到均匀的过程。

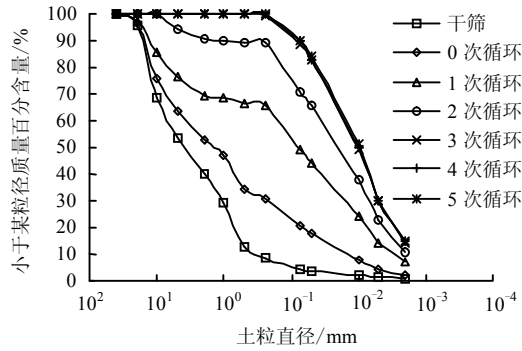


图4 干湿循环后的颗粒分布曲线
Fig.4 Grain-size distributions after drying and wetting cycles

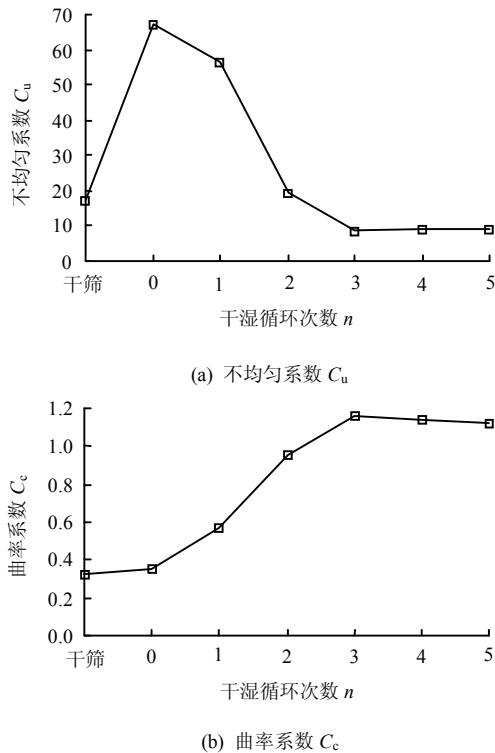


图5 不均匀系数、曲率系数随干湿循环次数变化
Fig.5 Changes of nonuniform coefficient and curvature coefficient with drying and wetting cycles

4 膨胀岩崩解的粒度熵表征

4.1 统计熵的概念

熵最初是用来描述热力学系统状态几率与无序度的量度, 后来在熵概念的基础上提出描述系统信息不确定性测度, 即统计熵^[13]。在一个含有 m 个相同盒子的离散系统中, 假设第 i 个盒子存放着 M_i 个单元, 整个系统总共存放着 M 个单元, 则该系统的统计熵为

$$S_s = Ms \quad (1)$$

式中: s 为单元熵。

$$s = -\sum_{i=1}^m \alpha_i \lg_b \alpha_i \quad (2)$$

式中: b 为对数的底; α_i 为第 i 个盒子的频率。表达式为

$$\alpha_i = \frac{M_i}{M} \quad (3)$$

当只有两个盒子时, 系统最大熵值为 1 (在 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 时得到), 对应式 (2) 中对数底 b 为 2, 因此, 式 (2) 可以简化为

$$s = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^m \alpha_i \ln \alpha_i \quad (4)$$

4.2 粒度熵及其标准化

根据统计熵定义, 每个盒子宽度是一样的, 为了应用统计熵的概念, 选定 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体高度 2^{22} mm 作为单元盒子宽度 d_0 。Lőrincz 定义了“截断”的概念, 将单元盒子嵌入截断中, 考虑到岩土介质粒径的范围较大, 截断尺寸一般以 2 为倍数等比递增^[8-9]。然而, 常用的标准筛孔径并非呈等比形式递增, 将截断尺寸分别设为常用的标准筛孔径, 由此得到第 i 个截断的颗粒粒径 d 的范围为

$$D_i \geq d > D_{i-1} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中: N 为最大和最小颗粒之间所包括截断数目; D_i ($i=0, 1, 2, \dots, N$) 为截断尺寸序列。

单元盒子嵌在截断内, 每一个单元盒子的宽度都为 d_0 , 则第 i 个截断内的单元盒子的数量为

$$C_i = \frac{D_i - D_{i-1}}{d_0} = 2^{22} \cdot \Delta D_i \quad (6)$$

式中: ΔD_i 为第 i 个截断的宽度。

设第 i 个截断的颗粒含量为 P_i , 则各截断的颗粒含量之和应满足:

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (7)$$

假设颗粒在截断内分布均匀, 则第 i 个截断颗粒在基本单元 j 内的概率为

$$\alpha_j = \frac{P_i}{C_i} \quad (j=1, 2, \dots, C_i) \quad (8)$$

将式 (8) 代入 (4) 中, 粒度熵 S 的表达式为

$$\begin{aligned} S = & -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{C_i} \alpha_j \ln \alpha_j = \\ & -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N C_i \frac{P_i}{C_i} \ln \left(\frac{P_i}{C_i} \right) = \\ & \sum_{i=1}^N P_i \frac{\ln C_i}{\ln 2} + \left(-\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) 可以写成基础熵 S_0 和熵增量 ΔS 两部分

$$S = S_0 + \Delta S \quad (10)$$

其中

$$S_0 = \sum_{i=1}^N P_i \frac{\ln C_i}{\ln 2} \quad (11)$$

$$\Delta S = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (12)$$

当所有颗粒都在一个截断内时, 粒度熵等于基础熵, 称为该截断的单元基础熵, 也称之为该截断的特征熵, 第 i 个截断的特征熵为

$$S_{0i} = \frac{\ln C_i}{\ln 2} \quad (13)$$

根据上述设定的截断尺寸, 当所有颗粒在第 N 个截断内时, 特征熵最大值为

$$S_{0\max} = \frac{\ln C_N}{\ln 2} \quad (14)$$

当所有颗粒在第 1 个截断时, 特征熵的最小值为

$$S_{0\min} = \frac{\ln C_1}{\ln 2} \quad (15)$$

为了便于在同一水平下进行比较研究, 将粒度熵进行标准化处理。标准基础熵 A 和标准熵增量 B 可以表示为

$$A = \frac{S_0 - S_{0\min}}{S_{0\max} - S_{0\min}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \ln C_i - \sum_{i=1}^N P_i \ln C_1}{\ln C_N - \ln C_1} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \ln \left(\frac{C_i}{C_1} \right)}{\ln \left(\frac{C_N}{C_1} \right)} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \ln \left(\frac{\Delta D_i}{\Delta D_1} \right)}{\ln \left(\frac{\Delta D_N}{\Delta D_1} \right)} \quad (16)$$

$$B = \frac{\Delta S}{\ln N} \quad (17)$$

任何一条颗粒级配曲线都可以根据上述级配曲线与 2 个粒度熵参数的映射关系 ($f_i: \Delta \rightarrow [S_0, \Delta S]$)

或 $f_n: \Delta \rightarrow [A, B]$) 进行量化^[8-9]。其中, 标准基础熵反映了截断宽度差异的影响, 反映了各粒组含量大小, 粗颗粒含量越多, 标准基础熵越大, 反之越小^[9-10]。

4.3 膨胀岩崩解的粒度熵表征

参考 Erguler 等^[14]提出的崩解比的概念, 分别计算各颗粒级配曲线上方与 0.002 mm 和 40 mm 竖线围成的面积, 将干湿循环后与初始状态 (干筛) 的面积差, 与初始状态 (干筛) 面积的比值定义为崩解比 (D_R)。1 次干湿循环对应的崩解比计算示意图如图 6 所示。

$$D_R = \frac{\text{Area}(acd)}{\text{Area}(abc)} = 0.463 \quad (18)$$

同理, 计算得到各干湿循环次数下的崩解比, 其中初始状态对应的崩解比为 0, 计算结果如表 3 所示。

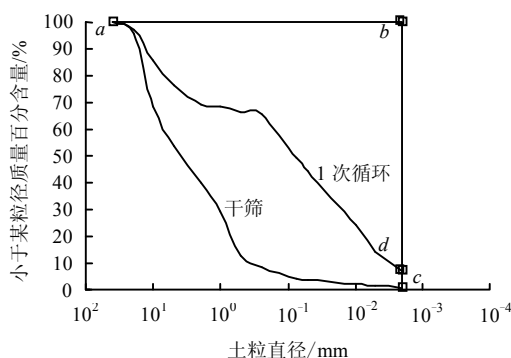


图 6 崩解比 D_R 计算示意图
Fig.6 Calculation of disintegration ratio D_R

根据粒度熵的定义, 分别计算得到不同干湿循环次数后的 A 和 B , 如表 3 所示, 建立 A 与 D_R 的线性回归关系, 如图 7 所示。由图可知, 崩解比随标准基础熵增大而减小, 二者拟合优度达到 0.985, 具有较为明显的线性负相关关系, 该关系可以表示为

表 3 粒度熵和崩解比计算结果

Table 3 Calculation results of grading entropy and disintegration ratio

干湿 循环 次数 n	颗粒含量/%													崩解比 D_R	标准基 础熵 A	标准熵 增量 B
	40~ 20 mm	20~ 10 mm	10~ 5 mm	5~ 2 mm	2~ 0.5 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.075 mm	0.075~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.002 mm	<0.002 mm			
干筛	4.4	26.9	15.2	13.2	10.7	17.0	4.4	4.0	0.7	1.4	0.5	0.8	0.8	0.000	0.751	1.153
0	3.8	20.4	12.3	10.6	5.9	12.8	3.4	10.1	3.0	9.8	3.6	2.5	1.8	0.214	0.643	1.315
1	2.6	11.6	9.6	6.6	1.1	1.8	0.8	16.8	4.7	20.2	9.7	7.4	7.1	0.513	0.463	1.166
2	0.0	0.0	5.8	3.7	0.6	0.4	0.5	18.4	5.0	27.8	14.9	12.3	10.6	0.915	0.355	1.100
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	11.3	5.5	33.5	19.5	15.6	14.4	0.995	0.307	1.106
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	9.9	6.6	32.9	20.0	15.3	15.1	0.995	0.299	1.109
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	9.8	5.9	32.7	21.5	14.8	15.1	0.996	0.296	1.102

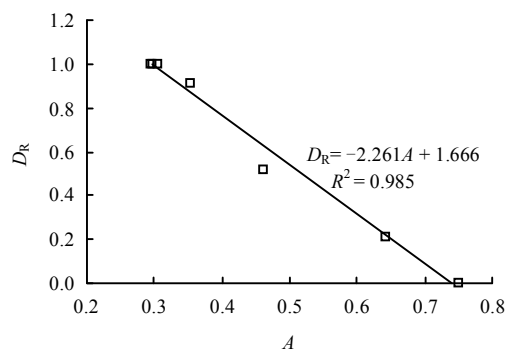


图7 标准基础熵 A 与崩解比 D_R 的关系

Fig.7 Relationship between relative base entropy A and disintegration ratio D_R

$$D_R = -2.261A + 1.666 \quad (19)$$

二者存在着内在联系, D_R 物理意义相对明确, 反映了颗粒崩解破碎程度, 因此, 将 A 作为描述膨胀岩崩解特性的指标是合理可行的。 A 越小, D_R 越大, 表明颗粒崩解破碎程度越大。

标准基础熵与干湿循环次数的关系如图 8 所示, 拟合得到二者的关系可以表达为

$$A = 0.279 + 0.367e^{-0.752n} \quad (20)$$

拟合优度高达 0.994, 标准基础熵与干湿循环次数关系密切。 A 随干湿循环次数的增加先迅速减小, 后逐渐趋于某一定值, 粗颗粒迅速崩解成细颗粒, 细颗粒含量急剧增加, 颗粒崩解性减弱, 当粗颗粒全部崩解后, 各粒径颗粒含量逐渐趋于稳定, 标准基础熵能较好地反映膨胀岩崩解颗粒特征随干湿循环次数的变化规律。

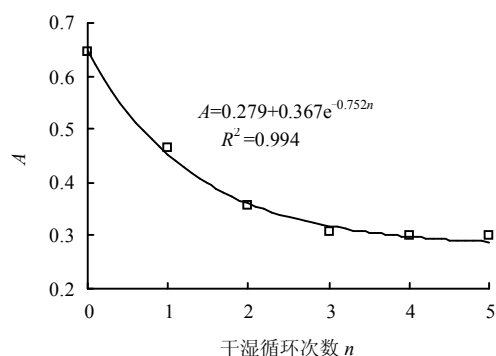


图8 标准基础熵 A 随干湿循环次数 n 的变化规律

Fig.8 Change law of relative base entropy A with drying and wetting cycles n

利用标准基础熵得到的颗粒含量变化规律与级配曲线变化规律一致, 符合实际情况, 进一步说明本文用标准基础熵表征膨胀岩崩解特性是合理可

行的, 是一种值得在工程实践中推广应用的新方法。另外, 延吉膨胀岩崩解性较强, 路堑边坡开挖后应及时采取防水保湿措施, 构建地下和地表的排水系统, 防止地表水下渗, 加快地下水排出, 同时应保证岩土体具有一定含水率, 避免膨胀岩在干湿循环作用下崩解泥化, 强度降低, 影响边坡的稳定性。

5 结 论

(1) 以延吉盆地膨胀岩为研究对象, 研究干湿循环作用下膨胀岩的颗粒变化规律, 结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 粗颗粒快速崩解, 细粒含量增加, 土颗粒大小经历了由均匀到不均匀, 再到均匀的过程。

(2) 标准基础熵 A 能较好地描述膨胀岩在干湿循环作用下崩解颗粒特征, A 与崩解比 D_R 存在较明显的线性关系, D_R 随着 A 的增加而减小, 将 A 作为表征膨胀岩崩解颗粒特征的定量指标是合理可行的, A 越小, 颗粒崩解程度越高。

(3) 随着干湿循环次数的增加, 标准基础熵先迅速减小, 后逐渐趋于定值, 与颗粒级配曲线及其衍生指标变化规律相符, 验证了利用标准基础熵 A 定量描述颗粒崩解特征的合理性。

(4) 膨胀岩边坡开挖以后应及时进行防水保湿处理, 防止发生崩解泥化现象。

(5) 膨胀岩的崩解是一个复杂的物理过程, 本文尝试将粒度熵概念应用到膨胀岩崩解定量描述中, 更接近工程实际情况的膨胀岩崩解规律及其粒度熵表征是下一阶段研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Engineering behavior of special rock and soil[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机制的讨论[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 1-5.
TAN Luo-rong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1-5.
- [3] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28-31.
LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28-31.

- [4] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(增刊 2): 4173—4179.
WU Dao-xiang, LIU Hong-jie, WANG Guo-qiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 29(Supp. 2): 4173—4179.
- [5] 赵明华, 苏永华, 刘晓明. 湘南红砂岩崩解机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 16—19.
ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua, LIU Xiao-ming. Research on the mechanics of the swelling and collapse of the red stratum rock mass in south Hunan[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2006, 33 (1): 16—19.
- [6] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 软岩崩解分形机制的数学模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2043—2047.
LIU Xiao-ming, ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua. Mathematical simulation of fractal mechanism for slaking of soft Rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2043—2047.
- [7] LŐRINCZ J. Grading entropy of soils[D]. Budapest: University of Budapest, 1986.
- [8] IMRE E, LŐRINCZ J, RÓZSA P. Characterization of some sand mixtures[C]//Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India: [s. n.], 2008: 2064—2075.
- [9] LŐRINCZ J, IMRE E, GÁLOS M, et al. Grading entropy variation due to soil crushing[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2005, 5(4): 311—320.
- [10] 田海, 孔令伟, 赵翀. 基于粒度熵概念的贝壳砂颗粒破碎特性描述[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1152—1159.
TIAN Hai, KONG Ling-wei, ZHAO Chong. Characterization of particle breakage with grading entropy on shell sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1152—1159.
- [11] LŐRINCZ J, TARNAI T, TRANG Q P, et al. The characterization of the grains and the pores, applications[C]//Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India: [s. n.], 2008: 976—983.
- [12] 徐日庆, 畅帅, 李雪刚, 等. 基于裂离参量的粒状土颗粒破碎量化方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2179—2185.
XU Ri-qing, CHANG Shuai, LI Xue-gang, et al. A quantization method for crushing of granular soil based on discarding parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(12): 2179—2185.
- [13] RENYI A. On measures of entropy and information[C]//Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1961: 547—561.
- [14] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. **Engineering Geology**, 2009, 108(1—2): 36—42.

上接第 1973 页

- [17] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435—2440.
LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2435—2440.
- [18] 李晓锋, 李海波, 夏祥, 等. 类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583—591.
LI Xiao-feng, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 583—591.
- [19] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [20] 吴德伦, 张平, 叶晓明. 岩石充填节理的动直剪试验及其本构模型[C]//中国岩石力学与工程学会第三次大会. 中国北京: 科学出版社, 1994.
WU De-lun, ZHANG Ping, YE Xiao-ming. The dynamic direct test of filled discontinuities and its constitutive models[C]//Proc. of the 3rd Conference of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 1994.
- [21] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713—719.
SHEN Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 713—719.
- [22] KULHAWY F H. Stress deformation properties of rock and rock discontinuities[J]. **Engineering Geology**, 1975, 9(4): 327—350.