

基于灰色关联法的膨胀岩崩解性影响因素分析

唐晓宇, 高文华, 张宗堂, 易梅辉, 邬俊

(湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 膨胀岩的崩解是众多工程灾害的主要诱因,这种崩解现象的影响因素是多样的。而灰色关联分析法是用于衡量各影响因素之间联系程度的数据分析方法,其本质是以数据处理的方式求出不同影响因素间发展趋势的相异或相似程度。采用一种分形维数的计算方法求得膨胀岩崩解的分形特征,并基于灰色关联分析法,探究在不同干燥温度、初始单块质量、干湿循环次数为影响因素的情况下,对膨胀岩崩解机理的影响程度。经过灰色关联分析,得到各影响因素对膨胀岩崩解分形维数的关联度排序为初始单块质量 < 干燥温度 < 干湿循环次数。结果表明,在处理膨胀岩的过程中,干燥温度、初始单块质量、干湿循环次数等都对膨胀岩崩解产生很大影响,其中干湿循环次数的影响最大。

关键词: 灰色系统关联; 分形维数; 膨胀岩; 干湿循环; 崩解

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0240-06

Influencing factors of disintegration of swelling rock based on grey system correlation analysis

TANG Xiaoyu, GAO Wenhua, ZHANG Zongtang, YI meihui, WU Jun

(Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The disintegration of swelling rocks is the main inducement of engineering disasters, which is influenced by various factors. Grey system correlation analysis is a method of measuring the correlation between factors according to the degree of dissimilarity or similarity of the development trend. The fractal characteristics of swelling rock disintegration were obtained using the calculation method of fractal dimension. Based on the grey system correlation analysis method, the influences of different drying temperatures, different initial mass of single rock and the number of dry - wet cycles on the disintegration of swelling rocks were explored. Through grey system correlation analysis, the correlation of each influencing factor to the fractal dimension of swelling rock disintegration was ranked as the number of dry - wet cycles > the drying temperatures > the initial mass of single block. The results showed that the drying temperatures, the initial mass of single rock, and the number of dry - wet cycles affected disintegration greatly, among which the correlation degree of the number of dry - wet cycles is the greatest.

Key words: grey system correlation; fractal dimension; swelling rock; dry - wet cycle; disintegration

1 研究背景

膨胀岩是一种特殊类型的软岩,且与水关系紧密,亲水性强烈^[1]。膨胀岩中所含有的大量亲水矿物使其在干湿循环作用下发生不均匀的体积变化,进而产生崩解。膨胀岩在我国广泛分布,修建在膨

胀岩地区的交通、水利、矿山等领域的工程遇水崩解的问题也日益突显,所以,研究分析膨胀岩的崩解特性具有重要意义。对于已有的膨胀岩的崩解性研究,国内外学者通过岩石崩解试验,证明岩石崩解现象的必要条件是湿度变化,即水分迁移^[2-4]。同时,膨胀岩在多次干湿循环造成的水分迁移作用下,其

收稿日期:2019-07-23; 修回日期:2019-10-20

基金项目:湖南省教育厅重点科研项目(16A073); 湖南省研究生科研创新项目(CX20190790); 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室开放基金项目(E21807)

作者简介:唐晓宇(1995-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。

通讯作者:张宗堂(1991-),男,甘肃会宁人,博士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。

崩解反应随干湿循环次数的增加而逐渐累积^[4-5]。在膨胀岩的崩解过程中,由于其崩解产物的粒径分布具有良好的分形特征,使得膨胀岩的崩解性可以用分形维数来表示。

膨胀岩的崩解特性是多种因素造成的,为探究其各因素之间的关联程度,结合数据样本量稀少和影响因素信息贫乏的特点,本文采用灰色关联分析法。灰色关联分析法来自于由邓聚龙^[6]创立的灰色系统理论,该方法对比因素间的动态发展趋势的异同程度,并衡量因素之间的关联度,可以有效地处理分析数据“样本量稀少和影响因素信息贫乏”的问题^[7]。关于膨胀岩崩解反应中灰色关联法的应用,申培武等^[8]通过灰色关联法分析圆形度的变化特征能更好地反映膨胀岩崩解的状态,刘晓明等^[9]利用灰色关联法分析膨胀岩矿物成分与其崩解之间的关系,但是关于膨胀岩在崩解过程中各外界因素对膨胀岩崩解性影响的相关程度的研究鲜有报道。因此,本文基于灰色关联分析法,对膨胀岩崩解的分形特征受不同干燥温度、不同外界扰动、干湿循环次数等因素的影响程度展开研究。

2 膨胀岩崩解特性试验

对膨胀岩进行静态崩解试验,该崩解试验的步骤为:(1)对试样进行前期加工至一定质量,烘箱设置如表 1 所示的固定温度,使用烘箱将试样干燥至恒重,烘干时间在 24 h 以上,随即取出试样,使试样冷却至室温;(2)将试样放置在合适容器中,完全浸入自来水中,持续浸泡 24 h 以上,同时容器中自来水的水量保持相同;(3)烘箱设置如表 1 所示的固定温度,使用烘箱将试样干燥至恒重,烘干时间在 24 h 以上,随即取出试样,使试样冷却至室温,然后对试样进行筛分试验,该环节中标准筛的筛孔径为 60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm,分别称量并做好记录,其中粒径小于 0.075 mm 的部分通过质量守恒求得。上述(2)、(3)步骤作为一次干湿循环,由于本试验需要 20 次干湿循环,所以将每次干湿循环后的崩解物残留样重复上述步骤(2)、(3),直至完成试验。

根据不同干燥温度情况下的静态崩解和动态崩解试验以及初始单块质量不同情况下的静态崩解试验,分析温度变化、初始扰动程度和干湿循环次数等影响因素对膨胀岩崩解性的关联度,其中根据相关试验测定^[10],TN01、TN02、TN03、GN01、GN02、GN03 为强膨胀岩,TL01、TL02、TL03、GL01、GL02、

GL03 为中强膨胀岩,各试验方案分别见表 1 和 2。

表 1 不同干燥温度试验方案表

膨胀岩类别	试样编号	干燥温度/℃	单块质量/g	初始平均单块质量/g	循环次数
强膨胀岩	TN01	110	40~60	51.10	20
	TN02	60	40~60	51.90	20
	TN03	30	40~60	51.10	20
中强膨胀岩	TL01	105	40~60	48.92	20
	TL02	60	40~60	52.18	20
	TL03	30	40~60	54.29	20

表 2 不同初始单块质量试验方案表

膨胀岩类别	试样编号	干燥温度/℃	单块质量/g	初始平均单块质量/g	循环次数
强膨胀岩	GN01	110	20~40	33.23	20
	GN02	110	60~80	70.34	20
	GN03	110	140~170	150.29	20
	GN04	110	290~330	311.98	20
	GN05	110	450~480	472.59	20
	GN06	105	580~640	611.00	20
中强膨胀岩	GL01	105	20~40	26.88	20
	GL02	105	60~80	79.64	20
	GL03	105	140~170	144.55	20
	GL04	105	290~330	318.39	20
	GL05	105	450~480	453.52	20
	GL06	105	580~640	631.35	20

3 膨胀岩崩解的分形特征

3.1 质量与粒径关联的分形维数计算方法

分形几何是常用来描述自然界杂乱不规则现象的手段^[11],目前多采用自相似性分形。而膨胀岩是亲水矿物颗粒胶结而成的几何体,水的作用下其崩解现象反应活跃,且膨胀岩的崩解现象是由大量微小破碎集聚成的小破碎组成。相关研究发现,膨胀岩具有从内部损伤到外部破碎的自相似性行为^[12],所以分形理论适用于分析膨胀岩的崩解反应。

由于膨胀岩的室内浸水崩解试验可以方便可靠地得到崩解后膨胀岩的各粒组颗粒分布情况,且自相似性一般是分形维数的基础,因此,本文采用关联分形维数^[13],对膨胀岩崩解分形进行描述。

结合韩培锋等^[14]对堆石料崩解分形特征的描

述,并基于分形理论,可将试样总质量设为 M ,对崩解物进行筛分,试样总质量包括该筛网下的崩解物总质量以及剩余的崩解物总质量,即:

$$M = M_a(d) + M_b(d) \quad (1)$$

式中: M 、 $M_a(d)$ 、 $M_b(d)$ 分别为试样总质量、筛网下的崩解物总质量、剩余的崩解物总质量, g; d 为筛孔径, mm。

定义质量和粒径的关联函数 $N(d)$ 为:

$$N(d) = \frac{M_a(d)}{M} = 1 - \frac{M_b(d)}{M} \quad (2)$$

膨胀岩崩解后的崩解产物是具有开放性的自组织系统,其物质构成的空间结构由粒度分布表示。设超过某粒径 d_i 的崩解产物颗粒在三维空间中占有的体积为 V ,则 V 可表述为:

$$V = \eta_V - \eta_V(d_i/\lambda_V)^{3-D} \quad (3)$$

式中: η_V 与 λ_V 分别为描述崩解产物大小、形状系数; D 为分形维数; V 为体积, mm^3 。

根据 Tyler 等的假定^[15-16],膨胀岩崩解产物的不同颗粒应有相同密度,所以超过某粒径的崩解产物颗粒质量有:

$$M_b(d_i) = \rho\eta_V - \rho\eta_V(d_i/\lambda_V)^{3-D} \quad (4)$$

式中: $M_b(d_i)$ 为超过某粒径的崩解产物颗粒质量, g。

考虑 $d_i = 0$ 和 $d_i = d_{\max}$ 的情况,以确定公式(4)中的参数。其中,当 $d_i = 0$ 时,公式(4)中 $M_b(d_i)$ 为崩解产物总质量 M ;假定崩解产物中最大颗粒粒径为 $d_{\max}$,即当 $d_i = d_{\max}$ 时, $M_b(d_i) = 0$ 。分别代入公式(4),则有:

$$M = \rho\eta_V \quad (5)$$

$$\lambda_V = d_{\max} \quad (6)$$

对公式(2)~(6)进行推导,得出膨胀岩崩解物颗粒质量及粒径之间的关系式为:

$$\frac{M_a(d_i)}{M} = 1 - \frac{M_b(d_i)}{M} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (7)$$

两边取对数有:

$$\frac{\lg[M_a(d_i)/M]}{\lg(d_i/d_{\max})} = 3 - D \quad (8)$$

其中, $M_a(d_i)/M$ 由筛分后崩解产物的质量统计得出,并求出线性回归后质量与粒径的关系曲线中直线的比例关系系数 k ,即公式(18)中 $(3-D)$ 的值,分形维数 D 则为:

$$D = 3 - k \quad (9)$$

3.2 分形维数求解

由上述分形维数 D 的计算方法,可求得膨胀岩崩解的分形维数,考虑同时列举各因素影响下崩解

产物的分形维数求解过程所占篇幅过大,此处仅列举 TL01、TL02 和 TL03 试样在干湿循环次数为 20 次时, k 值的线性拟合结果如图 1 所示,其中横坐标为粒径比对数 $\lg(d_i/d_{\max})$,纵坐标为质量比对数 $\lg[M_a(d_i)/M]$ 。

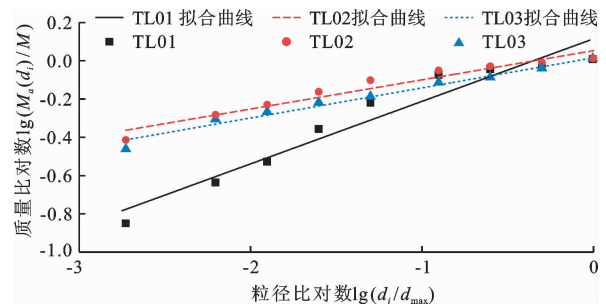


图1 TL01、TL02 及 TL03 试样干湿循环 20 次 k 值拟合

由图 1 可以得出,TL01、TL02 和 TL03 试样在干湿循环次数为 20 次时的相关系数 R^2 分别为 0.930、0.940、0.975,故膨胀岩崩解产物的粒径分布数据具有很好的线性拟合关系。试验数据的曲线拟合也表明,膨胀岩崩解产物的粒径分布具有分形特征。

3.3 各因素对分形维数的影响

分形维数 D 是膨胀岩崩解产物分形特征的量化指标,不同因素影响下,崩解产物每次经过干湿循环崩解前后的粒度分布变化的程度,表示膨胀岩颗粒发生崩解的程度。根据拟合的 k 值,基于影响因素为不同干燥温度 and 不同初始单块质量,分别得出每一次干湿循环后崩解产物的分形维数 D 值,并通过分形维数 D 值与干湿循环次数 N 之间的关系图给出。

图 2 为不同干燥温度下强膨胀岩和中强膨胀岩试样的 $D-N$ 关系曲线。由图 2 可知,分形维数在逐次干湿循环后不断增加,其增速逐渐降低,直至平缓。根据第 3.1 节分形维数 D 的计算方式,分形维数越高,在同一粒径比数值为横坐标的质量比对数值越小,即崩解产物中大颗粒占比相对减少、细颗粒占比相对增大。

造成上述现象的原因归结为:干湿循环造成的水分置换会定量地对膨胀岩崩解产生影响,膨胀岩在水的作用下不断在前一次干湿循环的基础上崩解,干湿循环次数越多,水分置换次数越多,膨胀岩中的亲水矿物在水分置换中不断膨胀收缩导致岩体裂隙发展,从而加剧崩解反应,导致膨胀岩岩体逐渐崩解破碎;且第 2 次干湿循环后,膨胀岩岩体在具有一定初始裂隙的基础上,亲水矿物发生膨胀再收缩反应,导致较大粒径岩体颗粒迅速崩解,而随着干

湿循环次数增加,小粒径崩解物颗粒质量占比不断增大,每个岩体颗粒中的裂隙影响相对降低,从而分形维数 D 的变化速率减小。

由图 2(a)可以看出,强膨胀岩 3 个试样在第 2 次干湿循环崩解前, TN02 试样的分形维数低于 TN01 和 TN03,而在随后的崩解试验中 TN02 试样的分形维数增长幅度最大,而 TN01 试样的增长幅度

最小,从而在第 20 次循环后,分形维数排序由小到大变为 TN01、TN03、TN02。同时,从图 2(b)也可看出, TL02 试样的分形维数在干湿循环过程中始终高于 TL01 和 TL03 试样, TL01 试样的分形维数最低。对比图 2(a)与 2(b)可知,强膨胀岩 TN01 ~ TN03 试样崩解产物的分形维数基本高于中强膨胀岩 TL01 ~ TL03 试样。

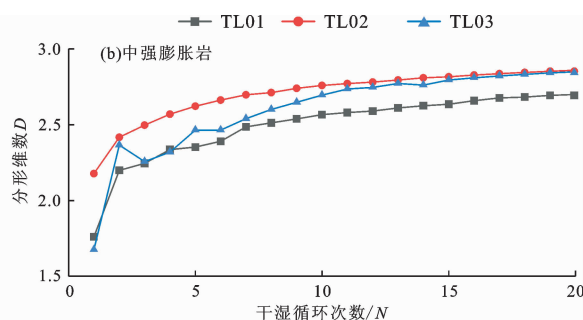
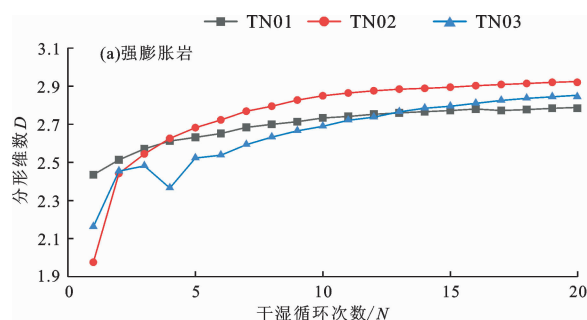


图2 强膨胀岩和中强膨胀岩试样在不同干燥温度下 $D-N$ 关系图

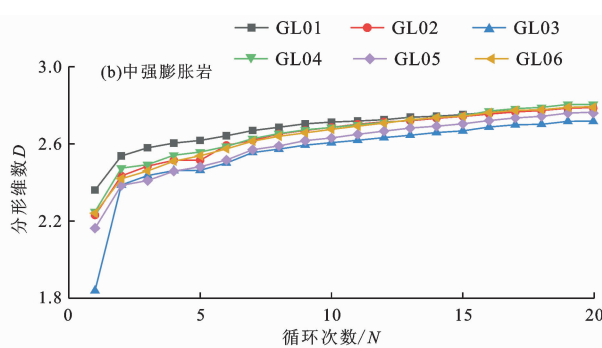
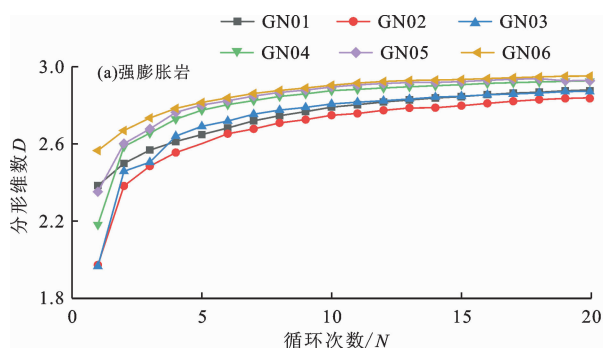


图3 强膨胀岩和中强膨胀岩试样不同初始单块质量的 $D-N$ 关系图

产生以上现象的原因归结为:考虑到干燥温度是影响膨胀岩内外水分置换的重要因素之一,干燥温度作为变量的时,干燥温度为 60°C 的 TN02、TL02 试样中的含水量在每次干湿循环作用下置换时间最长,水对膨胀岩的作用效果最为明显,亲水矿物从吸水膨胀到失水收缩的体积变化程度最大,导致 TN02、TL02 试样崩解反应更为明显,且在每一次干湿循环后持续崩解; TN03、TL03 试样相较于 TN01、TL01 试样在干燥过程中水分置换更彻底、水分作用时间更短,所以,相对于水分在膨胀岩内部停留的时间,亲水矿物的吸水量和失水量导致的矿物体积变化幅度能更有效地促进膨胀岩的崩解。同时,由于不同类别的膨胀岩矿物含量和组成的不同,导致强膨胀岩 (TN01 ~ TN03) 的崩解反应较中强膨胀岩 (TL01 ~ TL03) 更加剧烈。

初始单块质量不仅衡量膨胀岩的初始块度大小,同时也反映了膨胀岩试样在崩解反应之前的受

扰动程度。图 3 为不同初始单块质量的强膨胀岩和中强膨胀岩试样的 $D-N$ 关系曲线。

根据图 3,在初始单块质量不同时,干湿循环次数 N 和分形维数 D 的关系曲线基本表现为:分形维数 D 随着干湿循环次数 N 的增加而不断增大,且增长速率不断减缓。膨胀岩分类为强膨胀岩时,第 1 次循环后,膨胀岩崩解产物的初始分形维数 D 按由小到大排序为 GN03、GN02、GN04、GN05、GN01、GN06;第 20 次循环后,其分形维数 D 由小到大的排序为 GN02、GN03、GN01、GN04、GN05、GN06。其中 GN02、GN03 试样分形维数 D 的增长幅度最大, GN01 试样的增长幅度最小; GN05、GN06 试样分形维数 D 在数值上始终较大。比较图 3(a)与 3(b)可知,强膨胀岩 GN01 ~ 06 试样崩解产物的分形维数基本高于中强膨胀岩 GL01 ~ 06 试样。

产生以上现象的原因归结为:在初始单块质量作为单一变量的条件下,单块质量更高的膨胀岩内

部由外部作用影响导致的裂隙发展等缺陷程度更高,而质量太小的膨胀岩在加工制作土样时存在更大程度的扰动,也会在一定程度上加深对内部结构的破坏,从而导致 20 次循环后,初始单块质量越大分形维数越高,且单块质量低于某一值时分形维数未到达最小值;从分型维数增长幅度的方向分析, GL01、GL05、GL06 试样的分形维数增长幅度低于 GL02、GL03 试样,是因为初始扰动比较大的试样在第 1 次干湿循环崩解后,其较易破碎的裂隙已经发展完毕,随后的崩解中成熟裂隙对膨胀岩崩解的影响降低所致。同样地,由于不同类别的膨胀岩矿物含量和组成不同,导致强膨胀岩崩解反应较强烈的现象,这一现象也出现在初始单块质量为单一影响因素的情况下。

4 基于灰色关联理论的膨胀岩崩解性影响因素分析

4.1 灰色关联分析法

在膨胀岩的崩解试验中,由于试验成本的限制,进行影响因素分析的试验样本数有限,而灰色关联分析法注重各种因素之间的宏观分析和基本态势等,不需要大量的数据和丰富的信息。该方法实质是分析各影响因素对被影响对象的影响程度,从中找出主要因素与次要因素。针对膨胀岩的崩解反应,不同因素对膨胀岩崩解性的影响程度各异。因此,采用灰色关联法分析膨胀岩崩解试验并进行数据分析,可以求出各因素关联度,即对膨胀岩崩解性的影响程度,从而对实际工程提出指导性意见。

灰色关联分析法在进行数据处理时,采用的是灰色关联度为特征因子对主行为序列的影响程度,该数据处理方法归纳如下^[17]:

设存在一系统特征数列为参考数列(主行为),记作 Y_0 ,其表达式为:

$$Y_0 = \{Y_0(l) \mid l = 1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

另存在一系统因素数列,记作 $Y_i, i = 1, 2, \dots, m$ (m 为比较数列因子个数,即点数):

$$Y_i = \{Y_i(l) \mid l = 1, 2, \dots, n\} \quad (11)$$

在膨胀岩崩解试验中,影响因素的意义各不相同,为方便对比分析,按公式(12)对参考数列(主行为)和因素数列进行无量纲化的数据变换:

$$\bar{Y}_i(l) = \frac{Y_i(l) - \bar{Y}_i}{\Delta Y_{i \max}} \quad (12)$$

$$i \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$$

其中, $\bar{Y}_i$ 为数列中各点的平均值,按公式(13)

计算; $\Delta Y_{i \max}$ 为数列中各点的互差的最大值,按公式(14)计算:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{l} \sum_{l=1}^n Y_i(l) \quad (13)$$

$$\Delta Y_{i \max} = \max \{|Y_i(k) - Y_i(l)| \mid k, l = 1, 2, \dots, n\} \quad (14)$$

数列 $\bar{Y}_0(l)$ 与数列 $\bar{Y}_i(l)$ 在 $l(1 \leq l \leq n)$ 的关联系数为:

$$\xi_i(l) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(l) + \rho \Delta_{\max}} \quad (15)$$

式中: $\xi_i(l)$ 为关联系数,对应 l 样品在 Y_i 对 Y_0 中的数据; ρ 为对比系数,一般为 $\rho \in [0, 1]$, 本文采用 0.5; $\Delta_{\max}$ 为因素数列($Y_i, i = 1, 2, \dots, m$) 在数据中各点与对应的参考数列(Y_0) 各点差值的最大绝对值; $\Delta_{\min}$ 为因素数列($Y_i, i = 1, 2, \dots, m$) 在数据中各点与对应的参考数列(Y_0) 各点差值的最小绝对值。分别按公式(16)及(17)计算:

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_l |\bar{Y}_0(l) - \bar{Y}_i(l)| \quad (16)$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_l |\bar{Y}_0(l) - \bar{Y}_i(l)| \quad (17)$$

$\Delta_i(k)$ 为 k 点与参考数列对应点差值的绝对值,按公式(18)计算:

$$\Delta_i(l) = |\bar{Y}_0(l) - \bar{Y}_i(l)| \quad (18)$$

由于关联系数 $\xi_i(l)$ 只能表示不同样品数据间的关联程度,灰色关联分析法为解决关联系数存在不易于集中对比的这一问题,将关联系数集中处理,最终结果以关联系数的平均值来表示因素间的关联程度,即灰色关联度。关联度计算公式为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_l \xi_i(l) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

关联度 r_i 表示因子 Y_i 对主行为 Y_0 的影响程度,对于 $l, j \in (1, 2, \dots, n)$, 当 $Y_l > Y_k$ 时,那么认为系统因素数列 Y_l 相较于 Y_k 与主行为数列的相关性更高。

4.2 试验结果分析

试验设置的控制影响因素包括干燥温度(30℃、60℃、105℃)、初始单块质量、干湿循环次数。对该 3 种影响因素进行灰色关联分析,定义膨胀岩崩解产物的分形维数 D 为主序列。其中干燥温度反映膨胀岩的干湿循环过程中膨胀岩含水率变化的速度和含水量变化率的大小,初始单块质量反映膨胀岩在崩解反应之前初始扰动的程度。定义序列 1(Y_1) 为干燥温度,序列 2(Y_2) 为初始单块质量,序列 3(Y_3) 为干湿循环次数。

根据 4.1 中所述的灰色关联分析计算步骤计算

得到干燥温度、初始单块质量、干湿循环循环次数与崩解产物分形维数的关联度,计算结果见表 3。

表 3 各影响因素对崩解产物分型维数的关联度

影响因素	关联度	排序
干燥温度 (Y_1)	0.710	2
初始单块质量 (Y_2)	0.678	3
干湿循环次数 (Y_3)	0.758	1

由灰色关联度理论得知,参考数列和各影响因素数列的关联度能反映各因素数列对参考数列的影响程度,且关联度和影响程度呈正相关。由表 3 可知,3 个影响因素与膨胀岩崩解产物的分形维数 D 均有一定的关联度,关联度排序为 $Y_3 > Y_1 > Y_2$,即干湿循环次数对膨胀岩崩解产物的分形维数的影响程度最大,然后依次是干燥温度、初始单块质量。从膨胀岩崩解的机理出发,红砂岩崩解反应的关键是其矿物含量及组成情况,由于红砂岩富有大量的亲水性、可溶性和膨胀性矿物,这些矿物具有连接力弱、比表面积大等特点,使膨胀岩在干湿循环中导致岩体内含水量变化时,发生膨胀收缩的崩解现象。因干湿循环次数反映的是膨胀岩崩解过程中水分置换的定量情况,所以对于膨胀岩崩解反应的影响因素中,水分置换次数的影响最高,岩体内含水量变化程度和速度对膨胀岩体崩解的作用次之,崩解反应前膨胀岩的受扰动情况作用相对较弱。

由于膨胀岩具有遇水崩解的现象,需要膨胀岩的分形维数达到一个稳定值,而膨胀岩在自然环境中崩解的时间超出工期限制,就要对膨胀岩进行人为促进的预处理。实际操作具体为,将爆破开采的膨胀岩先进行若干次人为的干湿循环处理,使较大岩块中的初始裂隙快速发展,然后进行人工破碎,在增大岩块表面积的同时,加剧新裂隙的形成和发展;尽量在高温季节对膨胀岩作多次干湿循环的崩解处理。通过这种人为的控制使膨胀岩快速软化崩解,从而达到工程指标。

5 结 论

本文采用灰色关联分析法对膨胀岩的干燥温度、初始单块质量、干湿循环次数和外界扰动次数与崩解产物的分形维数进行了关联度分析,得到了以下结论。

(1)根据膨胀岩崩解后,其崩解破碎的岩块具有自相似性的分形特征,以质量与颗粒粒径相关联

的分形维数为基础,分析得到膨胀岩崩解的分形特征,给出一种合适的分形维数求解方法,并通过试验验证了这种分形维数求解方法的合理性。

(2)基于灰色系统理论的概念,给出了灰色关联度的计算方法,并采用关联度来描述干湿循环作用下膨胀岩崩解过程中各影响因素的相关程度;基于数据处理结果,认为灰色关联分析法能够判别出崩解过程中各影响因素的相关程度,是一种分析各影响因素重要性的数据处理方法。

(3)试验中膨胀岩崩解的影响因素,即干燥温度、初始单块质量和干湿循环次数对膨胀岩崩解产物的灰色关联分析结果表明,各因素均对膨胀岩崩解产生一定的影响,且有着较高的关联程度。根据灰色关联分析,在各影响因素中,干湿循环次数对膨胀岩崩解的影响最大,干燥温度其次,初始单块质量对膨胀岩崩解的影响相对较小。

(4)根据各影响因素与膨胀岩耐崩解性指数的灰色关联度,以及各影响因素与膨胀岩崩解产物的分形维数的关系,分析得出膨胀岩最佳的崩解时节是在高温季节,崩解顺序从大粒径膨胀岩开始,在一定粒径时需进行人为干湿循环处理,使岩体更高效地崩解破碎。

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.

[2] PHIENWEJ N. Ground response and support performance in a sheared shale, Stillwater Tunnel[D]. Urbana: University of Illinois, 1987.

[3] YAMAGUCHI H, YOSHIDA K, KUROSHIMA I, et al. Slaking and shear properties of mudstone[C]//International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Madrid, Spain,1988.

[4] 曾志雄,孔令伟,田海,等.膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J].岩土力学,2017,38(7):1983-1989.

[5] 梁冰,曹强,王俊光,等.弱崩解性软岩干湿循环条件下崩解特性试验研究[J].中国安全科学学报,2017,27(8):91-96.

[6] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.

[7] DENG Julong. Control problems of grey system[J]. Systems and Control Letters,1982,1(5):288-294.

[8] 申培武,唐辉明,汪丁建,等.巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J].岩土力学,2017,38(7):1990-1998.

(下转第 253 页)

- 究进展[J]. 内蒙古林业调查设计, 2017, 40(4): 92-94.
- [71] 赵牧秋, 金凡莉, 孙照炜, 等. 制炭条件对生物炭碱性基团含量及酸性土壤改良效果的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 299-303+309.
- [72] 王义祥, 辛思洁, 叶菁, 等. 生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 108-111.
- [73] MCDONALD L M, SCHUMACHER T E, CHINTALA R, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. CLEAN - Soil Air Water, 2014, 42(5): 626-634.
- [74] 鲁新蕊, 陈国双, 李秀军. 酸化生物炭改良苏打盐碱土的效应[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 462-466.
- [75] 周志云, 马文连, 周振, 等. 磷酸改性生物炭和氯混施对土壤铅形态及小麦铅吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 899-906.
- [76] FRÉDÉRIC R, DHYÈVRE A, MOREL J L, et al. Decrease in the genotoxicity of metal-contaminated soils with biochar amendments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(36): 1-8.
- [77] 周楫, 余亚伟, 蒋越, 等. 生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 987-993.
- [78] XING Ying, WANG Jianxu, XIA Jicheng, et al. A pilot study on using biochars as sustainable amendments to inhibit rice uptake of Hg from a historically polluted soil in a Karst region of China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 170: 18-24.
- [79] NORINI M P, THOUIN H, MIARD F, et al. Mobility of Pb, Zn, Ba, As and Cd toward soil pore water and plants (willow and ryegrass) from a mine soil amended with biochar[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 117-130.
- [80] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 等. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 361-368.
- [81] ALIZADEH S, PRASHER S O, ELSAYED E, et al. Effect of biochar on fate and transport of manure-borne estrogens in sandy soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 73(11): 166-180.

(上接第245页)

- [9] 刘晓明, 赵明华, 苏永华, 等. 红层软岩崩解性的灰色关联分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(4): 16-20.
- [10] 朱训国, 杨庆. 膨胀岩的判别与分类标准[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 174-177.
- [11] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982.
- [12] 张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 930-937.
- [13] RUIZ-CARULLA R, COROMINAS J, MAVROULI O. A fractal fragmentation model for rockfalls[J]. Landslides, 2017, 14(3): 875-889.
- [14] 韩培锋, 樊晓一, 田述军, 等. 堆石料崩解分形特征及其对堆石坝渗流影响[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(5): 102-106+122.
- [15] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987.
- [16] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362.
- [17] DENG Julong. Gray system[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1985.