

# 湘潭地区红层软岩在淋雨条件下崩解的分形维数研究

杨峰峰<sup>1</sup>, 张巨峰<sup>1,2</sup>, 郑超<sup>1</sup>, 许泰<sup>1</sup>

(1. 陇东学院 能源工程学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 采用室内模拟自然降雨的崩解试验,对湖南湘潭地区的红层软岩制成4种不同质量的试样进行了干湿循环淋雨崩解试验,推导了体积与粒径关联的分形维数 $D_v$ 求解方法,并采用 $D_v$ 对试验后试样的崩解特性进行了研究。结果表明:不同质量红层软岩试样崩解后的累计百分含量与粒径关系曲线的形状非常相似,曲线的形状整体呈上凸型。随着干湿循环次数 $N$ 的增加,红层软岩试样的大颗粒逐渐减少,小颗粒逐渐增多,崩解物级配曲线渐渐趋于重合,反映出试样的崩解速率逐渐放缓。随着各组试样质量的不断增大,曲线上凸的部分越发突出。随着 $N$ 的增加,不同质量试样的 $D_v$ 先迅速增大,然后增速逐渐放缓,最终基本达到稳定。随着试样质量的逐渐增加,试样的 $D_v$ 逐渐增大,表明岩样的质量越大,则其崩解的速率越快。

**关键词:** 红层软岩; 崩解; 淋雨; 分形维数; 干湿循环; 湘潭地区

中图分类号: P313.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0213-05

## Study on the fractal dimension of red-bed soft rock disintegration in Xiangtan, Hunan Province under rain conditions

YANG Fengfeng<sup>1</sup>, ZHANG Jufeng<sup>1,2</sup>, ZHENG Chao<sup>1</sup>, XU Tai<sup>1</sup>

(1. School of Energy Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China; 2. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the disintegration characteristics of red-bed soft rock in Xiangtan, Hunan province, the indoor disintegration tests of dry and wet cycles were carried out on four different mass samples under the simulated rain conditions. In addition, the calculation method of fractal dimension ( $D_v$ ) based on the correlation between the volume and the particle size of the rock was deduced and then used to study the disintegration characteristics of the samples after the disintegration tests. The results show that the curve shapes of the relationship between the cumulative percentage and the particle sizes of the samples after disintegration are very similar, which are uniformly convex. With the increase of the number of dry and wet cycles ( $N$ ), the large particles decrease, the small particles increase gradually, and the grading curves of disintegrated red-bed soft rock tends to coincide, reflecting that the disintegration rate of the samples slows down gradually. Furthermore, the convex part of the curve becomes more and more prominent with the increase of sample mass in each group. With the increase of  $N$ , the  $D_v$  of different sample mass increases rapidly at first, then slows down after the fourth cycle, and finally stabilizes. Besides, with the increase of the sample mass, the  $D_v$  of the samples increase gradually, indicating that the larger the sample mass is, the faster the disintegration rate will be. This phenomenon can be attributed to the influence of sample size effect on its disintegration characteristics.

**Key words:** red-bed soft rock; disintegration; rain; fractal dimension ( $D_v$ ); dry and wet cycle; Xiangtan of Hunan Province

收稿日期:2020-01-19; 修回日期:2020-05-31

基金项目: 甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019B-154); 甘肃省青年科技基金项目(18JR3RM240); 甘肃省安全生产科技项目(GAJ00011)

作者简介: 杨峰峰(1988-), 男, 甘肃静宁人, 硕士, 副教授, 主要从事安全科学与工程方面的教学与研究。

## 1 研究背景

相对于其他岩石,遇水易崩解是红层软岩最显著的性质之一。由于红层软岩的崩解,导致其性质逐渐由岩性转化为土性,从而对其物理力学性质产生较大影响<sup>[1]</sup>。湖南省湘潭市地区红层软岩分布广泛,且其水理性质非常显著,在施工现场裸露出来之后极容易发生分化,该红层软岩遇水崩解性质较强。由于该地区常年湿润,降雨非常频繁,从而加速了该地区红层软岩的崩解<sup>[2]</sup>。红层软岩的分化崩解会造成水土流失、滑坡、崩塌等一系列地质灾害,是该地区地质灾害比较严重的原因之一。因此,研究该地区红层软岩在自然环境中崩解的性质具有重要的理论与实际意义。

自然界的干湿变化及岩石本身的岩性是导致岩石崩解的重要因素<sup>[3-6]</sup>,大部分研究者认为湿度变化是岩石物理风化的主要控制因素<sup>[7-8]</sup>。张宗堂等<sup>[6]</sup>、邓涛等<sup>[9]</sup>、赵明华等<sup>[10]</sup>、刘晓明等<sup>[11-12]</sup>均针对软岩在不同条件下崩解的分形特征进行了研究,指出了软岩的崩解可以采用质量与粒径关联的分形维数进行描述。然而,现有研究中对于不同质量对红层软岩崩解性质影响的研究较为不足,且现有成果中均采用质量与粒径关联的分形维数进行描述。

考虑到红层软岩地区所存在的自然灾害及工程问题,本文采用在实验室内搭建淋雨装置的方法模拟自然界中降雨的实际环境,对湖南湘潭地区的红层软岩制成 40~60、110~130、370~390、430~450 g 共 4 种不同质量的试样,开展干湿循环作用下的室内崩解试验研究,并对红层软岩崩解之后各粒径组累计百分含量及各试样崩解后基于体积与粒径关联的分形维数变化情况进行深入分析。

## 2 红层软岩崩解试验

### 2.1 试样基本性质

试样取自湖南湘潭地区,现场取样如图 1。为了得到红层软岩的矿物成分,选取 3 组试样,进行 X 射线衍射试验,试验分析结果见图 2。对试验结果分析可得,本研究所采用红层软岩的主要矿组成分及其含量为(取 3 组试验结果的平均值):石英 44.26%、方解石 23.35%、云母 10.23%、绿泥石 11.41%、长石 5.88%、赤铁矿 4.87%。

按照规范要求<sup>[13]</sup>,在实验室进行了相关性试验,试验结果见表 1。图 3 为红层软岩放大 2 000 倍的电镜扫描 SEM 图像,从图 3 中可以看出,湖南湘

潭地区红层软岩微孔隙较为发达,微孔隙的分布非常明显,这种结构导致了水分容易沿着红层软岩内部的孔裂隙逐渐浸入红层软岩内部,从而产生崩解。



图 1 红层软岩现场取样

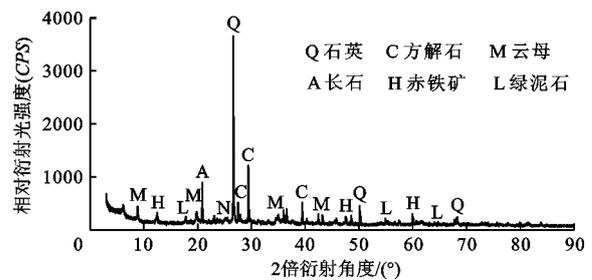


图 2 红层软岩的 X 射线衍射试验分析结果

表 1 试样相关性指标

抗压强度/MPa	含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
11.12	1.43	2.38

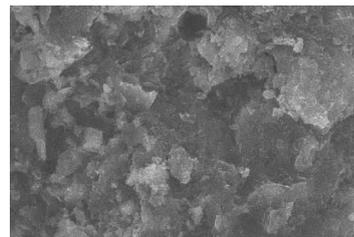


图 3 红层软岩放大 2000 倍 SEM 图

### 2.2 试验方法

依据《水利水电工程岩石试验规程》(DL/T 5368-2007)<sup>[13]</sup>,试验设计 4 组不同质量的红层软岩试样,依据上述规范将每个红层软岩试样加工成浑圆状,每组各 10 块红层软岩试样,每块试样所对应的质量范围分别为 40~60、110~130、370~390、430~450 g,各组试样对应编号依次为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>,每块试样的质量采用精度为 0.01 g 的天平称量获得。

崩解试验模拟自然界中的降雨过程,详细的试验方法为:(1)为了消除含水量的影响,首先要将试样中的水分去除,即将试样置于 105~110℃ 的烘箱中完全干燥;(2)待完全干燥后的试样温度等于常温时,再将其放于 0.075 mm 的标准筛盘上,置于模拟自然界降雨的喷淋装置下方进行浸水崩解试验(喷淋装置由多个喷头组成,喷头向上喷水至最高

点后自由落下,从而避免了水直接冲刷的影响),模拟降雨过程不少于 24 h;(3)将浸水崩解后的试样放于烘箱中烘干到恒重(烘干时间大于 24 h),最后,通过筛分得到试样崩解后各粒组的含量。反复进行上述试验步骤,直至达到 30 次循环试验。本文采用  $N$  表示干湿循环次数。

### 3 软岩崩解的分形理论

软岩的崩解满足分形分布<sup>[14]</sup>,按照现有研究<sup>[2,9,15-16]</sup>,假设崩解颗粒为球形。考虑筛分结果,若筛分使用的土工筛共有  $n$  个,那么崩解物颗粒可以划分成以下粒组: $(d_1 \sim d_2), (d_2 \sim d_3), \dots, (d_i \sim d_{i+1}), \dots, (d_{n-1} \sim d_n)$ ,其中  $d_i$  为第  $i$  个土工筛的孔径,分别取每个粒组中含有的颗粒数量为  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n\}$  个,将相邻两个筛孔孔径平均值定义为平均粒径,则 $(d_i \sim d_{i+1})$  粒组满足以下关系式:

$$m_i = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{x}{2}\right)^3\rho Q_i = V\rho Q_i = \rho \sum V_i \quad (1)$$

式中: $m_i$  为粒组 $(d_i \sim d_{i+1})$  内崩解物的总质量,g; $x$  为粒组 $(d_i \sim d_{i+1})$  的平均值,cm; $\rho$  为软岩的干密度,g/cm<sup>3</sup>;  $Q_i$  为 $(d_i \sim d_{i+1})$  粒组的颗粒数量; $V$  为粒组 $(d_i \sim d_{i+1})$  中一个颗粒的体积,cm<sup>3</sup>;  $\sum V_i$  为粒组 $(d_i \sim d_{i+1})$  崩解物颗粒的总体积,cm<sup>3</sup>。

谢和平<sup>[17]</sup>指出,满足分形分布的颗粒,有以下关系:

$$Q(x) = x^{-D_V} \quad (2)$$

式中: $Q$  为颗粒数量;  $D_V$  为分形维数。

大于粒径  $x$  的累计颗粒质量  $M$  为:

$$M \propto \int x^3 dQ \propto x^{3-D_V} \quad (3)$$

则,大于粒径  $x$  的总体积  $V$  为<sup>[18]</sup>:

$$V = C_V \left[ 1 - \left(\frac{x}{\lambda_V}\right)^{3-D_V} \right] \quad (4)$$

式中: $C_V, \lambda_V$  均为常数,与颗粒的大小、形状相关。

由公式(1)、(4)可知:

$$V \propto x^{3-D_V} \quad (5)$$

公式(5)即为满足体积与粒径关联的分形关系,令  $\alpha = 3 - D_V$ ,则由公式(5)可知其分形维数  $D_V$  可通过求解  $\lg V - \lg x$  所在直线的斜率  $\alpha$  得到。本文采用结合红层软岩崩解的数学模型与筛分试验,由公式(1)求得 $(d_i \sim d_{i+1})$  粒组的颗粒总体积,然后累加得到大于粒径  $x$  的总体积  $V$ ,采用回归分析得到  $\lg V - \lg x$  所在直线的斜率  $\alpha$ ,从而得到分形维数。

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 红层软岩崩解物各粒组累计百分含量

依据上述不同块度红层软岩室内淋雨崩解特性试验结果,图 4 为 4 组试样(1#、2#、3#、4#)在不同循环次数  $N$  下红层软岩崩解物各粒组累计百分含量与粒径的关系曲线。

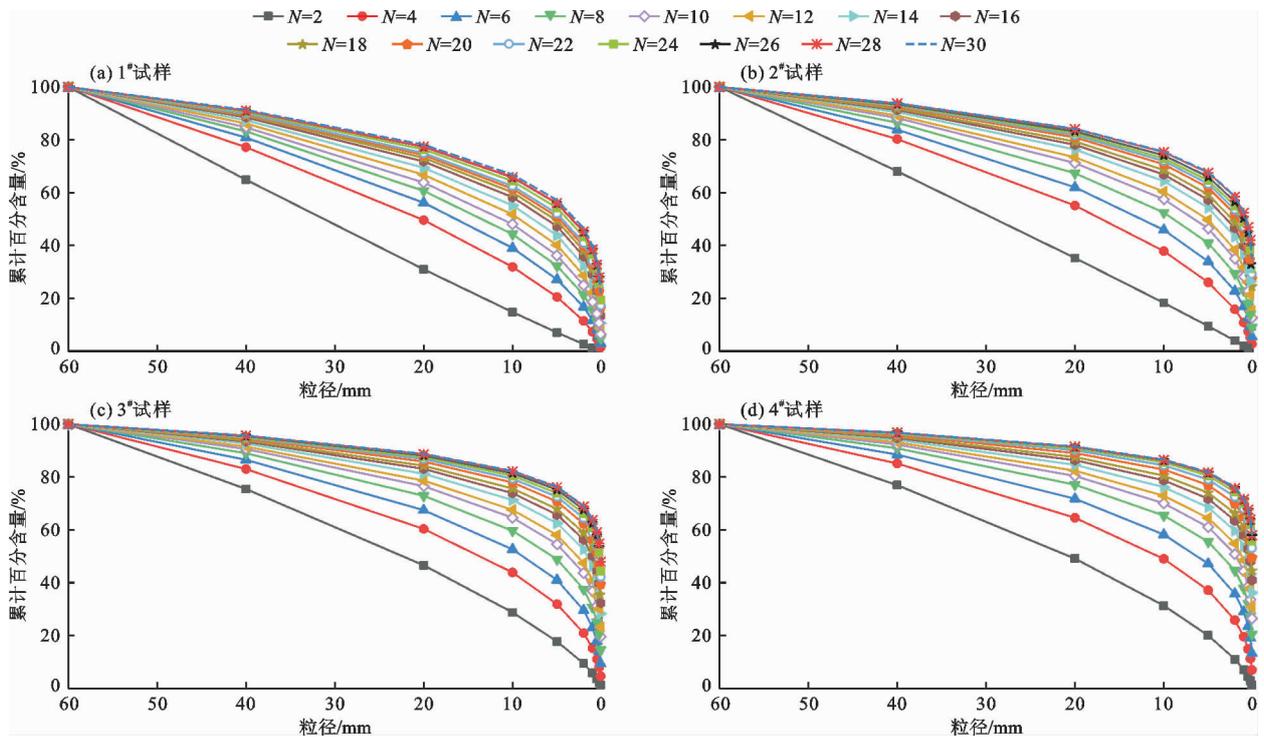


图 4 不同循环次数试样崩解物各粒组累计含量与粒径的关系曲线

从图4中可以看出,4组试样曲线的形状非常相似,曲线的形状整体呈上凸型。4组红层软岩试样各粒组累计百分含量与粒径的关系曲线整体上均表现出许多相似的变化规律,总结如下:(1)随着粒径的减小,曲线可以分为3个阶段,即:缓慢减小、加速减小、迅速减小为0;(2)随着干湿循环次数 $N$ 的不断增大,红层软岩崩解物各粒组累计百分含量关系曲线逐渐向着较小粒径的方向整体移动;(3)随着 $N$ 的增加,各曲线之间的间隙不断减小,最后基

本重合,反映出红层软岩的崩解速率逐渐减小且最后趋于稳定;(4)随着各组试样质量的不断增大,曲线上凸的部分越发突出,表明试样细颗粒逐渐增多。

#### 4.2 红层软岩崩解的分形维数

依据上述不同块度试样崩解试验结果,采用第3节推导的软岩崩解分形理论,求得不同循环次数下各组试样崩解的分形维数 $D_V$ 以及相应的相关系数 $R^2$ (1#、2#、3#、4#试样 $D_V$ 与 $N$ 的相关系数分别用 $R_1^2$ 、 $R_2^2$ 、 $R_3^2$ 、 $R_4^2$ 表示),见表2。

表2 红层软岩试样的分形维数 $D_V$ 及其与循环次数 $N$ 的相关系数 $R^2$

循环次数	1# 试样 $D_V$	$R_1^2$	2# 试样 $D_V$	$R_2^2$	3# 试样 $D_V$	$R_3^2$	4# 试样 $D_V$	$R_4^2$
1	1.9333	0.9993	2.0517	0.9943	2.3045	0.9815	2.3523	0.9951
2	2.3620	0.9891	2.4580	0.9982	2.5398	0.9896	2.6015	0.9833
3	2.4753	0.9840	2.5652	0.9944	2.6414	0.9811	2.6976	0.9829
4	2.5451	0.9832	2.6402	0.9831	2.7116	0.9811	2.7630	0.9816
5	2.5912	0.9927	2.6910	0.9986	2.7562	0.9863	2.8013	0.9751
6	2.6325	0.9849	2.7184	0.9865	2.7809	0.9869	2.8233	0.9975
7	2.6678	0.9936	2.7539	0.9968	2.8108	0.9884	2.8477	0.9859
8	2.6985	0.9816	2.7753	0.9835	2.8309	0.9866	2.8664	0.9979
9	2.7157	0.9899	2.7894	0.9819	2.8441	0.9819	2.8788	0.9864
10	2.7283	0.9962	2.8067	0.9978	2.8606	0.9978	2.8945	0.9904
11	2.7374	0.9924	2.8161	0.9852	2.8707	0.9929	2.9053	0.9972
12	2.7539	0.9878	2.8240	0.9956	2.8784	0.9982	2.9127	0.9931
13	2.7658	0.9995	2.8325	0.9915	2.8850	0.9925	2.9175	0.9847
14	2.7670	0.9895	2.8419	0.9799	2.8901	0.9847	2.9183	0.9863
15	2.7750	0.9863	2.8431	0.9817	2.8912	0.9993	2.9193	0.9852

由表2中的相关系数可知,本文推导的基本体积与粒径关系的 $D_V$ 计算方法可以很好地描述红层软岩的崩解过程。

图5为试样崩解 $D_V$ 与 $N$ 的关系曲线。

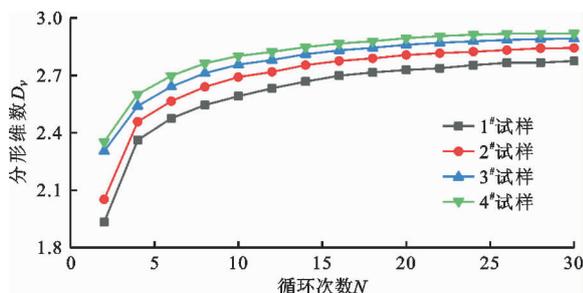


图5 各试样崩解 $D_V$ 与 $N$ 的关系曲线

从图5中可以看出,随着 $N$ 的增加,不同质量试样的 $D_V$ 先迅速增大,在第4次循环之后增速逐渐放缓,最终达到基本不变;随着试样质量的逐渐增加,

试样的 $D_V$ 逐渐增大,表明岩样的质量越大,其崩解的速率越快。这种现象可以归结为试样尺寸效应对其崩解特性的影响。

## 5 结论

(1)推导了基于岩石崩解后体积与粒径关联的分形维数 $D_V$ 求解方法,并结合本文开展的红层软岩淋雨条件下干湿循环崩解试验,验证了本文所推导模型的正确性。

(2)不同质量红层软岩试样崩解后的累计百分含量与粒径关系曲线的形状非常相似,曲线的形状整体呈上凸型;随着各组试样质量的不断增大,曲线上凸的部分越发突出,反映出试样细颗粒逐渐增多。

(3)随着循环次数 $N$ 的增加,不同质量试样的分形维数 $D_V$ 先迅速增大,最终达到基本不变。随着试样质量的逐渐增加,其崩解的速率逐渐加快。

## 参考文献:

- [1] 梁冰,谭晓引,姜利国,等. 泥质岩在不同 pH 值溶液中的崩解特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(2):23-27.
- [2] 黄明,詹金武. 酸碱溶液环境中软岩的崩解试验及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2015,36(9):2607-2612.
- [3] WEISS C, KOCH R, GERLACH I. Jurassic limestones used in the Almaqah Temple of Sirwah, northern Jemen - Use, weathering, and source[J]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 2007,158(3):571-592.
- [4] SUMNER P D, HEDDING D W, MEIKLEJOHN K I. Rock surface temperatures in southern Namibia and implications for thermally-driven physical weathering [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues, 2007, 51(1):133-147.
- [5] 李兰,周忠浩,杜树汉,等. 紫色土成土速率的估算与田间测定[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):393-400.
- [6] 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.
- [7] MOL L, VILES H A. Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes:Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa[J]. Geomorphology, 2010,118(3-4):280-287.
- [8] SAAD A, GUÉDON S, MARTINEAU F. Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze - thaw cycles:Experimental study of state and transfer parameters [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(3):197-203.
- [9] 邓涛,黄明,詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10):1480-1485.
- [10] 赵明华,陈炳初,苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2):351-356.
- [11] 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.
- [12] 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):2043-2046.
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水利水电工程岩石试验规程:DL/T 5368-2007[S]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [14] 涂新斌,王思敬,岳中琦. 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4):587-595.
- [15] 刘晓明,熊力,刘建华,等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10):3143-3149.
- [16] 熊力. 红层软岩崩解机理研究及工程应用[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
- [17] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [18] 石修松,程展林. 堆石料颗粒破碎的分形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2):3852-3857.
- [17] TAN Yong, WANG Dalong. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II:Top-down construction of the peripheral rectangular pit [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11):1875-1893.
- [18] 张伏光,蒋明镜. 基坑土体卸荷平面应变试验离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(1):339-348.
- [19] 胡勇,李云安,李波,等. 承压水位变动下深大基坑空间效应离心试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(6):1999-2007.
- [20] 叶帅华,丁盛环,龚晓南,等. 兰州某地铁站深基坑监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1):177-182.
- [21] 单仁亮,董洪国,陈代昆. 中深部含软弱夹层的深基坑土钉支护失稳破坏数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2):30-35.
- [22] 楼春晖,夏唐代,刘念武. 软土地区基坑对周边环境影响空间效应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1):249-252.
- [23] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in-situ walls conference on design and performance of earth retaining structures[C]//Geotechnical Special Publication No. 25. New York:ASCE,1990:439-470.
- [24] HASHASH Y M A, OSOULI A, MARULANDA C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2008,134(9):1399-1406.
- [25] 张德富,童立元,刘松玉,等. 苏州地铁1号线车站深基坑围护结构变形性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2):1961-1965.
- [26] KUNG G T C., JUANG C H, HSIAO E C L, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6):731-747.

(上接第212页)