

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.03.12

红黏土崩解特性试验研究

曾庆建¹, 刘宝臣¹, 张炳晖¹, 熊俊豪¹, 肖适德²

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200071)

摘要: 为了研究不同含水率和温度下红黏土的崩解特性, 将取自桂林的红黏土制备成不同含水率试样, 通过自制的试验设备对红黏土进行崩解试验。考虑红黏土吸水增重的影响, 每次崩解试验进行一次平行吸水试验, 用吸水试验的结果修正崩解量-时间关系曲线, 从而提出新的崩解量计算公式。本次试验探究在不同含水率和温度下红黏土的崩解特性。试验结果表明: 崩解量随含水率的增加而减少, 且含水率超过 25%, 红黏土在 2 h 内基本不发生崩解; 崩解量随温度的升高而增加, 但在自然环境下红黏土的崩解对温度不敏感。通过对含水率和温度的综合分析表明, 在自然气候范围内, 含水率是土体崩解的主要影响因素。

关键词: 红黏土; 崩解量; 含水率; 温度

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)03-0093-06

An experimental study of the disintegration characteristics of red clay

ZENG Qingjian¹, LIU Baochen¹, ZHANG Binghui¹, XIONG Junhao¹, XIAO Shide²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: In order to study the disintegration characteristics of red clay, red clay from Guilin is prepared into different water content samples, and the red clay is disintegrated by the homemade test equipment. Considering the effect of red clay on water absorption, a parallel water absorption test is carried out for each disintegration test. The disintegration-time curve is corrected with the results of the water absorption test, and a new dissolution calculation formula is proposed. In this experiment, the disintegration characteristics of red clay at different water content and temperatures are investigated. The results show that the amount of disintegration decreases with the increasing water content, and the water content is more than 25%. The red clay does not decompose in 2 h; the amount of disintegration increases with the increasing temperature, but in the natural environment, the disintegration of clay is not sensitive to temperature. The comprehensive analysis of moisture content and temperature shows that the moisture content is the main influencing factor for soil disintegration in the natural climate range.

Keywords: red clay; disintegration amount; water content; temperature

崩解现象的产生, 是因为土体没入水中之后, 水进入孔隙或裂隙中的情况不平衡, 导致粒间扩散层增厚的速率不一致, 使得粒间各处斥力超过吸力的情况各

不相同, 从而产生了应力集中, 使土体沿着斥力超过吸力最大的面崩落下来^[1]。

国内外很多学者在岩土崩解特性的研究中取得了

收稿日期: 2017-06-23; 修订日期: 2017-09-04

基金项目: 桂科能基金(16-J-21-6)

第一作者: 曾庆建(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事特殊土工程性质研究。E-mail: 2462431831@qq.com

通讯作者: 张炳晖(1983-), 男, 工程师, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: zhangbh1983@163.com

一定的成果。Gamble^[2]认为岩石崩解是因为湿度及温度的变化导致的,且湿度变化为主要控制因素; Yamaguchi等^[3]证明了假如没有水的迁移,温度的改变几乎不会对岩石的崩解产生影响;简文彬等^[4]采用浮筒法进行土体崩解试验时,提出了崩解量计算公式,经过进一步的完善已经被国内大多数试验规程所采用;张抒等^[5]采用改进后的浮筒法进行了花岗岩残积土的崩解试验研究,考虑了土中气体对试验的影响,并假设气体是均匀分布在土体中,且在整个试验过程中是匀速溢出的;兰泽鑫^[6]采用质量法进行了土的崩解试验研究,做了专门的吸水试验进一步考虑了土中气体所产生的影响;陈东等^[7]解决了水的波动对浮筒读数的影响。颜波等^[8]认为土体中孔隙气压力大于有效应力时,土体会产生崩解破坏;谈云志等^[9]认为初始压实状态对红黏土的变形影响显著,其变形过程可以分为启动、加速和稳定三个阶段。张泽等^[10]对不同含水率的亚黏土进行了崩解试验研究,发现当初始含水率接近风干含水率时,土体在完全崩解的过程中,崩解敏感性较强;在初始含水率接近天然含水率的情况下,土样在不完全崩解的过程中崩解敏感性较弱。郭永春等^[11]研究了红层泥岩崩解,提出了其崩解过程可分为开挖揭露、温度效应、水效应、时间效应以及剥落作用五个阶段。

目前对于土体的崩解研究主要集中在膨胀土、残积土、黄土的研究上,对于红黏土的崩解特性的研究甚少,需要研究人员对此进行深入研究。本文利用自制的试验装置,考虑红黏土吸水增重的影响,提出了新的崩解量计算公式,分析了含水率和温度对红黏土崩解的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试样来源与制备

本次试验所用的红黏土取自桂林雁山区某处工地,取样深度 30 ~ 90 cm。试验用土的基本物理性质见表 1,颗粒分析结果见图 1。制备含水率为 0%、3.5%、5.7%、12.2%、18.6%、25.1% 的试样。考虑不同季节雨水温度略有差异,并为了放大温度的影响效果,因此选定不同水温进行试验并比较结果,水温设定为 0℃、15℃、30℃、60℃。

表 1 红黏土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of red clay

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	孔隙比 e	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 I_p
37.5	1.81	2.67	1.07	33.4	60.0	26.6

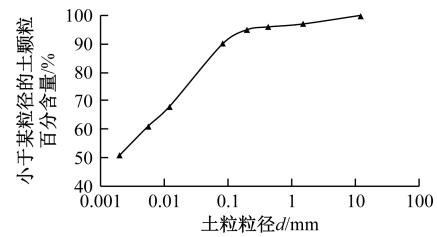


图 1 颗粒分析试验结果

Fig. 1 Results of particle analysis test

1.2 试样仪器与试验方法

1.2.1 试验仪器

试验设备主要包括:电子天平,量程 1 000 g,分度值 0.01 g;电子测力计,量程 2 000 g,分度值 1 g;铁丝间距 20 mm 的铁质网板,尺寸为 25 cm × 32 cm;水缸 2 个,尺寸为 50 cm × 35 cm × 35 cm 和 65 cm × 40 cm × 40 cm;计算机。其他部件还包括自制支架和配重,用于固定测力计并确保其处于垂直状态;秒表,用于人工记录时间和测力计数据,校验和检查数据以避免错误。

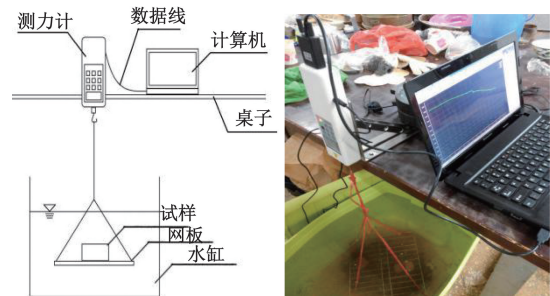


图 2 试验仪器设备图

Fig. 2 Pictures showing the test instruments and equipment

1.2.2 基本原理

崩解反应是一个复杂过程,试样浸没后,水或溶液渗入、孔隙气体排出及土颗粒吸附水等过程都在同时进行。本文从宏观角度考虑,建立模型,用吸水增重-时间曲线来修正崩解试验数据,得出崩解量-时间关系曲线。

试验前先将各部分仪器摆放好位置,检查测力计的感应指针方向是否垂直。挂载网板,检查网板是否处于水平状态,并调整至适当高度。测力计和计算机开机并联通,启动记录软件,在待命状态等候。每次试验的土样均分为 2 等份,分别用于同一组试验中的吸水试验和崩解试验。

崩解试验:入水前用天平称量试样的质量并记录。记录测力计挂载网板并浸入水中后的空载读数。将试样放入水中后测力计和计算机立即开始采集并记录数

据,同时开动秒表。试验进行过程中做好观测和文字描述,同时拍摄照片并记录拍摄时间。每3~5 min 手动记录一次测力计的读数,用于试验后核对数据,若出现错误则重新进行。网板上无任何残余试样或剩余试样长时间不再变化并且测力计读数也不发生改变时,试验结束,可以得出崩解量-时间曲线。

吸水试验:入水前先用天平称量试样的质量并记录。将试样装入容器中,并用滤纸封住容器口或包裹住试样,以防土颗粒逸散到水中,导致试样质量减少,其余操作与崩解试验相同。当测力计读数长时间不再变化时,试验结束,可以得出吸水量-时间曲线。

最后再用吸水试验的结果修正崩解量-时间关系曲线,得到最终的土体崩解试验结果。

修正后土体的崩解量为:

$$y_t = \frac{T_0 - T_t + m'_b}{T_0 - m'_b + \Delta m'_t} \quad (1)$$

式中: T_0 —— $t=0$ 时测力计受到的拉力/N;

T_t —— t 时刻测力计受到的拉力/N;

m'_b ——网板空载浸没读数/N;

$\Delta m'_t$ ——对应的崩解试验 t 时刻试样增重值/N;

y_t —— t 时刻崩解量。

式(1)中的 $\Delta m'_t$ 可由式(2)、(3)计算:

$$\Delta m_t = m_t - m_0 \quad (2)$$

$$\Delta m'_t = \Delta m_t \cdot \frac{M_b}{M_x} \quad (3)$$

式中: Δm_t ——吸水试验 t 时刻试样增重值/N;

m_0 ——吸水试验 $t=0$ 时测力计读数/N;

m_t ——吸水试验 t 时刻测力计读数/N;

M_x ——用于吸水试验的试样在空气中的质量/g;

M_b ——用于崩解试验的试样在空气中的质量/g。

含水率为0%的试样在105℃烘干箱72h后,进行崩解试验,得出未修正与修正后的崩解曲线对比图(图3)。从图中可以看出 $\Delta m'_t = 0.18$,修正后的崩解量略高于未修正的崩解量。同时在崩解试验前期,出现了较多气体逸出但无任何或者很少的土颗粒掉落下网板的情况(图4)。此时若不考虑吸水增重的因素,则崩解量-时间曲线就会出现负值(图3)。

2 试验结果及分析

崩解速度取决于两个因素:一是局部集中应力的

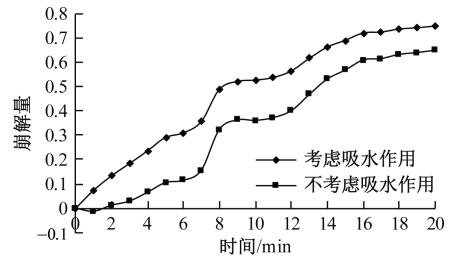


图3 崩解曲线对比图

Fig. 3 Contrast map of disintegration curve

大小,二是土体的强度。前者取决于土粒扩散层的厚度,后者取决于土的结构、胶结程度等^[12]。相比其他类型土的崩解^[13-14],桂林地区红黏土崩解过程中的特点是水体非常清澈,悬浮在水中的固体颗粒较少(图4)。仅仅在较高温度和含水率很低的情况下才会出现较多固体颗粒长时间悬浮于水中、水体变浑浊的情况。另外,崩落下来的土多呈片状和块状,因试验条件的不同其团粒大小也不同,多见直径1~30 mm之间,这是红黏土中黏粒含量高造成的。当含水率较大时,红黏土的崩解量曲线容易出现突变,这是由大块土粒掉落所致。



(a) 崩解初始大量气体溢出

(b) 崩解过半水体清澈

图4 试样崩解图

Fig. 4 Photographs of disintegration

2.1 不同含水率对红黏土崩解性的影响

室温15℃下不同含水率的红黏土崩解量-时间曲线(图5)总体规律是最终崩解量以及崩解速率均随含水率的增加而减小。当先期含水率达到25%后,试样基本不再具有崩解性。

图5表明含水率对土体崩解的影响显著,土体越干燥,崩解速率、最终崩解量都越高。随着土体中水分含量的增加,红黏土的崩解性迅速降低,当含水率高于5.7%后,土体在2h不能达到完全崩解。崩解曲线在整体上符合倒S型规律,即“初始-稳定-完成”三个阶段。但在含水率较低和较高时都不明显,这是因为试验中崩解量是由测力计传回的数据决定的,而单块黏土团粒掉落下网板在时间上有一定的随机性,在低含

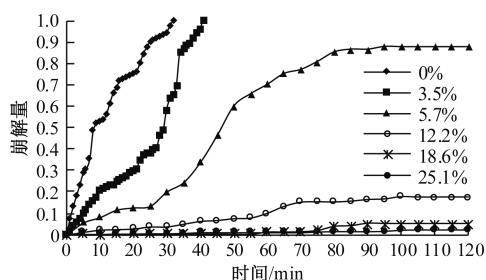


图5 不同含水率试样崩解曲线

Fig. 5 Disintegration curves with various water content

水率的试验中表现为曲线的波动;在含水率较高的情况下,因为最终崩解量小,崩解量的上升主要是由特定几块较大团粒掉落造成,这在崩解曲线中体现为某一时较短段内的突然增长,而多数时间中曲线较为平稳。表2为各试样的完全崩解平均速率、崩解稳定阶段平均速率以及在2 h 试验时间内的最终崩解剩余量。

表2 各试样崩解速率及剩余崩解量

Table 2 Rate of disintegration and the amount of residual disintegration of contents

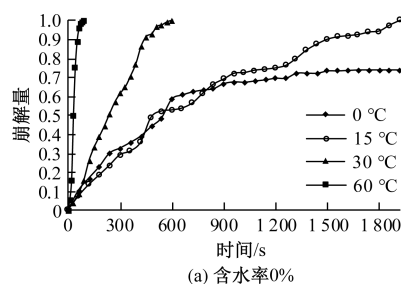
含水率	完全崩解平均速率/ min^{-1}	崩解稳定阶段平均速率/ min^{-1}	崩解剩余量/%
0%	0.031 3	0.040 3	0
3.5%	0.024 4	0.026 8	0
5.7%	0.007 3	0.014 9	12.00
12.2%	0.001 5	0.002 2	81.99
18.6%	0.000 4	0.001 1	95.03
25.1%	0.000 2	0.000 1	97.71

土样随着含水率减小崩解速率和崩解量增加主要原因有二:一是含水率低的土体投入水中时,土体膨胀不均匀,有助于崩解的发生。二是干燥土体投入水中时土样的四周立即饱水软化,强度降低,而土体内部含水率仍然较低;在进一步对内部土体的饱水过程当中,结合水膜逐渐扩大,原储存于孔隙中的空气被排挤出来,空气在挤出过程中,对已处于饱水软化状态的土体表层产生破坏,土体因此迅速崩解。这个规律也说明了为什么久旱后逢大雨,容易发生岩溶塌陷的普遍现象。

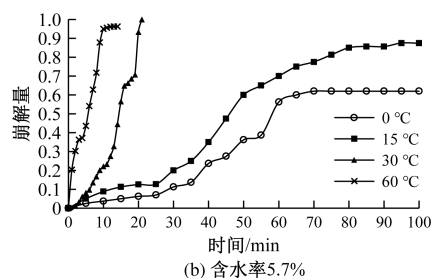
2.2 不同温度对红黏土崩解性的影响

0%、5.7%含水率的红黏土试样在不同水温中的崩解-时间关系图(图6)表明,室温和0℃两种温度下的崩解曲线较为接近,水温对崩解的影响较小,在自然环境下红黏土的崩解对温度不敏感。当温度达到30℃及以上时崩解过程明显加快,说明高温对红黏土崩解有较大的影响。图6中0℃试样在30 min内未达到完全崩解,是由于一些较大的土粒卡在网板铁丝之

间未能落下,通过肉眼观察,土体已经出现明显大的裂隙,并且相互贯通,此时可以看作整个土体是由许多小土块堆积而成,但它们并没有散落,而是相互叠加在一起,因此测力计也还有读数,实际上可以认为此时已经崩解完成,因为土块间只是松散堆积的关系,并没有联结。土块大小为2~4 cm。



(a) 含水率0%



(b) 含水率5.7%

图6 含水率0% (a)、5.7% (b) 试样在不同温度下的崩解-时间关系

Fig. 6 Collapsing-time relationship of water content of 0% (a) and 5.7% (b) at different temperatures

2.3 影响崩解的主要因素

为进一步确定产生崩解的主要因素,将不同含水率和温度下的崩解试验结果汇总。选取含水率为0%、5.7%两种试样在0℃、15℃、30℃水温下的崩解曲线进行对比(图7)。总体上来说含水率占据红黏土崩解因素中的主要地位。将它们按照含水率分成上下两组,每组中试样的崩解曲线又符合温度越高吸水量越多的规律。从两种含水率试样的完全崩

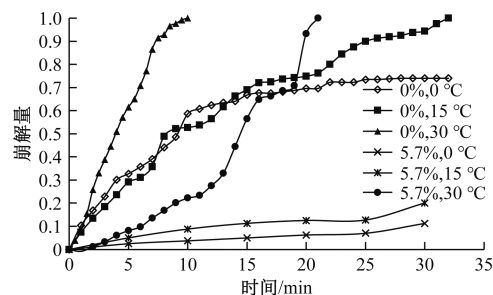


图7 不同含水率、温度条件下试样崩解-时间曲线
Fig. 7 Disintegration-time curve of samples under different moisture content and temperatures

解平均速率和崩解稳定阶段平均速率与温度的关系图中(图8~9)可以看出,崩解速率在0℃和15℃时基本相同,当温度进一步升高时才产生明显变化,且含水率低的试样崩解速率大于含水率高的试样。这充分说明了在自然气候范围内,含水率是土体崩解的主要影响因素。

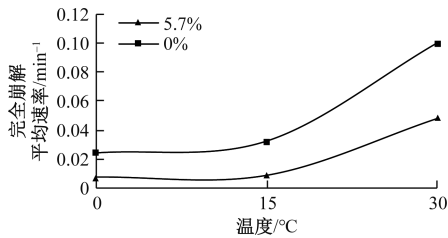


图8 不同含水率红黏土的完全崩解平均速率

Fig. 8 Average rate of complete disintegration of red clay with different moisture content

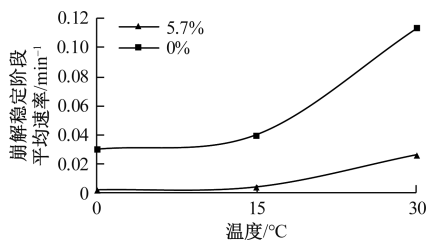


图9 不同含水率红黏土的崩解稳定阶段平均速率

Fig. 9 Average rate of disintegration stabilization phase of red clay with different moisture content

3 结论

(1)利用自制试验仪器开展红黏土崩解试验,考虑试验过程中土体吸水增重的影响,提出了新的崩解量计算公式。

(2)含水率越低,崩解现象越明显,当含水率小于3%时,试样可在40 min内完全崩解;当含水率小于5%时,崩解非常剧烈,最终崩解量大;当含水率大于25%后,土体在2 h的试验时间内基本不发生崩解,这可以为久旱突遇大雨后岩溶塌陷多发的现象提供理论依据。

(3)高温对红黏土崩解有较大的影响,当温度达到30℃及以上时崩解过程明显加快。但在0~15℃范围内水温对崩解的影响较小。说明在自然环境下红黏土的崩解对温度不敏感。

(4)通过对含水率和水温的综合分析表明,在自然气候条件可能达到的范围内,含水率是影响桂林地区红黏土崩解性的主要因素。

参考文献:

- [1] 刘之葵. 岩溶区溶洞及土洞对建筑地基影响的研究[D]. 长沙:中南大学,2004. [LIU Z K. Study on effect of cave and cave soil on building foundation in Karst Region [D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese)]
- [2] Gamble J C. Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks [D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1971.
- [3] Yamaguchi H, Yoshida Y, Kuroshima I, et al. Slaking and shear properties of mudstone [C]//Rock Mechanics and Power Plants. Rotterdam: Balkema A A, 1988: 133 - 144.
- [4] 简文彬, 陈文庆, 郑登贤. 花岗岩残积土的崩解试验研究[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社, 2003: 297 - 300. [JIAN W B, CHEN W Q, ZHENG D X. Experiment study of calving property for forunsaturated granite residual soil [C]//The 9th Chinese Institution of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering-China Civil Engineering Society Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 297 - 300. (in Chinese)]
- [5] 张抒, 唐辉明. 非饱和和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1668 - 1674. [ZHANG S, TANG H M. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1668 - 1674. (in Chinese)]
- [6] 兰泽鑫. 花岗岩残积土崩解试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. [LAN Z X. Experimental study on disintegration behavior of granite residual soil [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [7] 陈东, 王道杰, 陈晓艳, 等. 一种测定土壤崩解动态的方法[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1137 - 1141. [CHEN D, WANG D J, CHEN X Y, et al. Method to show dynamic process of soil disintegration [J]. Soils, 2013, 45(6): 1137 - 1141. (in Chinese)]
- [8] 颜波, 汤连生, 胡辉, 等. 花岗岩风化土崩解破坏机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 68 - 71. [YAN B, TANG L S, HU H, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 68 - 71. (in Chinese)]

(下转第105页)

- its effect for karst tunneling in high water pressure and water-enriched region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5 (5): 996 - 1002. (in Chinese)]
- [13] 王迪,徐涛. 富水流砂区间隧道注浆加固技术研究 [J]. 公路, 2017 (1): 246 - 250. [WANG D, XU T. Study on grouting reinforcement technology for tunnel in water-rich sand [J]. Highway, 2017 (1): 246 - 250. (in Chinese)]
- [14] 朱栋梁,李成学,徐干成,等. 别岩槽隧道注浆加固圈及二次衬砌厚度的确定 [J]. 铁道建筑, 2006 (11): 70 - 72. [ZHU D L, LI C X, XU G C, *et al.* Determination of grouting reinforcement ring and secondary lining thickness of Bieyancao tunnel [J]. Railway Engineering, 2006 (11): 70 - 72. (in Chinese)]
- [15] 王刚. 隧道富水地层帷幕注浆加固圈参数及稳定性研究 [D]. 济南:山东大学, 2014. [WANG G. Study on stability and parameters of curtain grouting reinforcement ring in water-rich strata of tunnel [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese)]
- [16] 薛晓辉,张军,宿钟鸣,等. 富水黄土隧道注浆加固机制及效果评价 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2015, 34 (4): 34 - 38. [XUE X H, ZHANG J, SU Z M, *et al.* Grouting pre-reinforcement mechanism and effect evaluation in water-rich loess tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34 (4): 34 - 38. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞

(上接第97页)

- [9] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 压实红黏土的湿化变形试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (3): 483 - 489. [TAN Y Z, KONG L W, GUO A G, *et al.* Experimental study on wetting deformation of compacted laterite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (3): 483 - 489. (in Chinese)]
- [10] 张泽,马巍, PENDIN Vadim V 等. 不同含水量亚黏土的崩解特性实验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (4): 104 - 107. [ZHANG Z, MA W, PENDIN Vadim V, *et al.* Experimental study of the disintegration characteristics of loam with different moisture content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (4): 104 - 107. (in Chinese)]
- [11] 郭永春,谢强,文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39 (5): 69 - 73. [GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39 (5): 69 - 73. (in Chinese)]
- [12] 李家春,田伟平. 工程压实黄土崩解试验研究 [J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24 (5): 74 - 77. [LI J C, TIAN W P. Experiment of compacted loess disintegration [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24 (5): 74 - 77. (in Chinese)]
- [13] 李喜安,黄润秋,彭建兵. 黄土崩解性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊 1): 3207 - 3213. [LI X A, HUANG R Q, PENG J B. Experimental research on disintegration of loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup1): 3207 - 3213. (in Chinese)]
- [14] 王健,马璠,张鹏辉,等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52 (6): 1273 - 1279. [WANG J, MA F, ZHANG P H, *et al.* Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6): 1273 - 1279. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华