

DOI: 10.11779/CJGE2020S2038

# 土体在水中的崩解对边坡稳定性的影响

齐永正, 姜朋明\*, 刘欣怡, 张勇玲, 邱琬茹, 王天格, 查文杰

(江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 库岸边坡失稳会对库区人民的生命财产造成巨大损失。水库滑坡不仅发生水位骤降时期, 在水库蓄水水位上升时期, 边坡同样会发生滑坡。从土体在水中崩解性状的角度探究水位上升期边坡滑坡机理。进行了相同体积不同底面边长(直径)的棱柱体和圆柱体试样在水中的崩解试验, 以及4种不同含砂率圆柱试样在水中的崩解试验。结果表明: 相同体积试样, 比表面积越大, 崩解速度越快; 试样在水中的位置越深, 试样崩解时间越短; 随着试样含砂率的增大, 试样崩解速度越来越快。土质边坡含砂率越大, 越易失稳破坏。

**关键词:** 土体崩解; 试验分析; 表面水膜; 渗透压力; 边坡失稳

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0214-05

**作者简介:** 齐永正(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地基处理和环境岩土等方面的教学和科研工作。E-mail: zmxtree@163.com。

## Influences of soil disintegration in water on slope stability

QI Yong-zheng, JIANG Peng-ming, LIU Xin-yi, ZHANG Yong-ling, QIU Wan-ru, WANG Tian-ge, ZHA Wen-jie

(School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The instability of the bank slope of the reservoir will cause great loss to the life and property of the people in the reservoir area. The landslide of the reservoir occurs in the periods of rapid falling and rising water level. The mechanism of slope landslide in the rising stage of water level is studied from the perspective of soil disintegration in water. A series of experiments on the disintegration of prisms and cylinders with the same volume and different bottom side lengths (diameters) are carried out. The disintegration tests on four kinds of cylinder samples with different sand contents in water are conducted. The results show that the larger the specific surface area of the same shape sample is, the faster the disintegration speed is. The deeper the water depth is, the shorter the disintegration time is. With the increase of the sand content, the disintegration rate of the soil sample is faster and faster. The larger the sand content of soil slope is, the more likely it is to be unstable.

**Key words:** soil disintegration; experimental analysis; surface water film; osmotic pressure; slope instability

## 0 引言

库岸边坡失稳会对库区人民的生命财产造成巨大损失。意大利 Vaiont 水库, 总库容 1.7 亿  $\text{m}^3$ , 水库蓄水, 水位抬高 120 m, 约 30 d 时间后发生灾难性的整体滑落, 滑坡体体积多达 2.4 亿  $\text{m}^3$ , 涌浪摧毁了下游的 6 个市镇, 造成了几千人死亡<sup>[1]</sup>。Roosevelt 湖附近滑坡, 49% 的滑坡发生在蓄水初期。在日本, 大约 40% 的水库滑坡发生在水位上升时期<sup>[2]</sup>。三峡在 175 m 库水位影响的范围内共有大小滑坡 1190 余个<sup>[3]</sup>。可见, 水库水位上升期间会引起库岸边坡失稳。刘才华等<sup>[4]</sup>指出库水位上升对边坡失稳与破坏的影响主要表现在孔隙水压力作用和浸水滑动面强度参数的弱化上; 崔洁通过软件计算结果显示水位上升速率越快, 边坡土体稳定系数越高<sup>[5]</sup>; Pan 等<sup>[6]</sup>研究表明边坡高度越高, 孔隙水压力与基质吸力的滞后作用越明显。刘博等<sup>[7]</sup>

研究表明非饱和土相对渗透系数与基质吸力关系曲线与库岸边坡的浸润面位置和安全系数有非常大的相关性。简文彬等<sup>[8]</sup>研究表明土体渗透系数越大, 土体湿润蔓延距离越深, 速度越快。综上所述, 水库水位上升引起的滑坡不容忽视。通常认为库水位上升产生浮力作用、坡体产生孔隙水压力及滑动面强度参数弱化导致边坡稳定性降低, 很少考虑水对边坡土体的崩解作用。

土体崩解是指岩土体浸水后发生散解、塌落的现

**基金项目:** 国家重点研发计划课题 (2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目 (51208321); 江苏省自然科学基金项目 (BK20151071); 江苏省建设系统科技项目 (2018ZD093); 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放研究基金项目 (2019008)

**收稿日期:** 2020-08-07

**\*通信作者** (E-mail: justcojpm@hotmail.com)

象<sup>[9]</sup>。土体发生崩解是因为土体没入水中之后, 导致粒间扩散层增厚的速率不一致, 使得粒间斥力超过吸力, 土体沿着斥力最大的面崩落下来<sup>[10]</sup>。土体遇水湿化崩解会造成岸坡失稳从而危及工程安全。Phienweij 等<sup>[11]</sup>认为, 崩解不是发生在失水过程中, 而是发生在吸水过程中, 岩体的干燥程度对岩体的崩解程度影响很大。Moriwaki 等<sup>[12]</sup>提出岩体崩解的主要原因是矿物吸水膨胀, 导致空气发生压缩, 产生张应力, 又由于差异性膨胀产生应力集中现象, 进而导致岩体崩碎。郑敏洲在关于残积土的崩解特性研究中发现含水率以及颗粒成分对崩解速率的影响, 含水率越大, 崩解速率越快, 粗颗粒含量越多, 崩解速率越快<sup>[13]</sup>。徐清扬研究了土崩解速率规律以及崩解与土体物理性质之间的关联等<sup>[14]</sup>。

因此, 边坡土体在水中的崩解应是影响库岸边坡失稳和破坏的重要因素之一。本文拟通过开展相同体积不同外形、不同水深土体崩解性状的试验研究, 探讨其对边坡失稳与破坏的影响。

# 1 土体崩解试验

## 1.1 试样制备

本试验土样取用镇江下蜀黄土, 土样的基本物理指标如表 1 所示。

表 1 下蜀土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of soil sample						
名称	含水率 $w$ /%	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	颗粒相对质量 密度 $G_s$	塑限 $w_p$ /%	液限 $w_L$ /%	塑性指数 $I_p$
下蜀黄土	23.7	19.9	2.73	19.2	34.8	15.6

砂样选取普通石英砂, 砂的颗粒级配如图 1 所示。

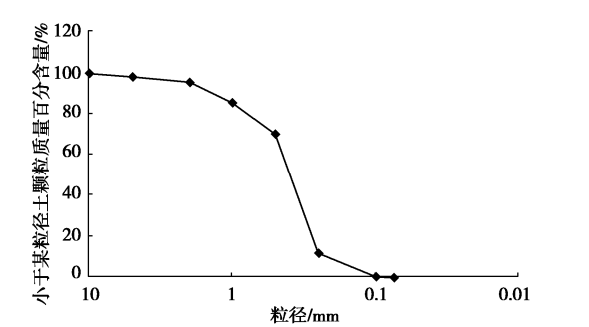


图 1 砂样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of sand sample

土样和砂样用烘箱完全烘干, 过 2 mm 标准筛后加水至含水率为 15%, 制作试样。试样分为底面直径 7, 10 和 12 cm 的圆柱体和底面边长 7, 10, 12 cm 的四棱柱体, 共 6 种, 所有试样按标准击实制备, 体积相同。

土样和砂样分别按含砂率为 0%, 30%, 50%, 70% 的配比充分拌合, 加水至含水率为 15%, 按标准击实制成底面直径 10 cm 的圆柱体试样, 放烘箱完全烘干。

## 1.2 试验过程

如图 2 所示, 试验水箱采用透明亚克力制作。水箱加水至水深 55 cm, 将准备好的试样连同铁丝网托盘放入水中预定深度, 铁丝网托盘通过四角吊绳悬挂于测力计挂钩上, 试样距水面的深度分别为 18, 30, 42 cm。每 30 s 记录一次数据 (含砂率试样每 10 s 记录一次数据), 直至试样完全崩解。重复上述步骤, 完成所有试验。

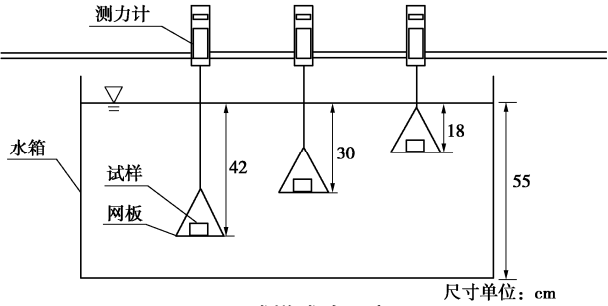


图 2 试样试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test model

# 2 试验结果及分析

## 2.1 不同水深相同外形试样崩解性状

图 3 为不同水深相同体积试样的崩解时程曲线。

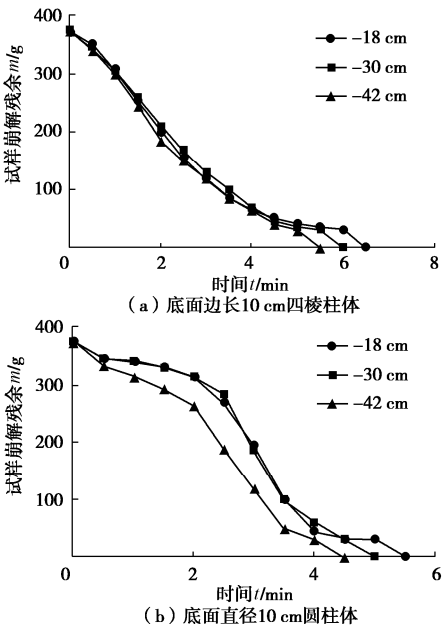


图 3 不同水深相同体积试样崩解时程曲线

Fig. 3 Disintegration curves of soil samples with same volume at different water depths

由图 3 可以看出, 在不同水深处, 试样的崩解时间是不同的。在相同初始条件下, 随着水深的增加,

试样的崩解时间缩短,水深 18 cm 处试样的崩解时间最长,水深 42 mm 处的试样崩解时间最短。

土体入水前,土中强结合水占据了土体孔隙中的绝大部分通道,渗透性很低,随着水深增大,水力梯度随之增加,渗透压力增大,水分子易于进入黏土层间,加速黏土膨胀,水化崩解,表现为水深越深,土体崩解越快。所以,水深对土体崩解具有重要影响。

2.2 相同水深不同外形试样崩解性状

图 4 为相同体积不同外形试样在不同水深处的崩解时程曲线。

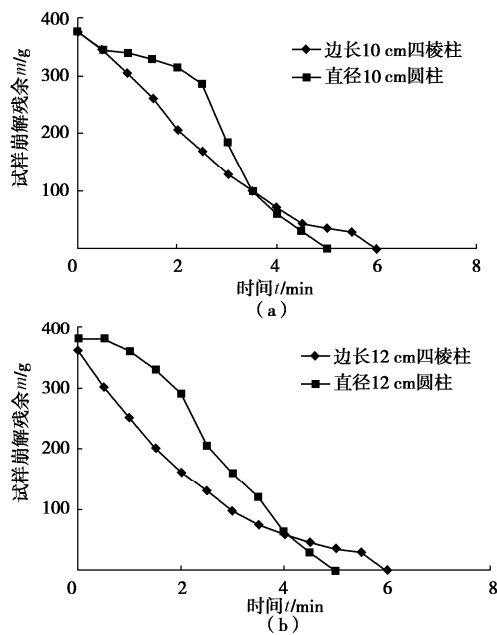


图 4 相同水深不同外形试样崩解时程曲线 (水深 30 cm)  
Fig. 4 Disintegration curves of soil samples with same water depth and different shapes (~30 cm)

从图 4 中曲线可以看出,相同体积相同深度处,在试样崩解初期,四棱柱试样崩解速率明显比圆柱体试样快;但在试样崩解后期,四棱柱试样崩解速率比圆柱体试样慢。两种不同外形试样,四棱柱试样比表面积大于圆柱体试样,棱角处黏土颗粒结合水膜易于吸水膨胀,造成土体崩解。因此,四棱柱试样入水前期崩解快于圆柱体试样。后期由于四棱柱体试样逐渐退化为圆柱体试样,崩解速率逐渐减缓。

2.3 相同水深不同直径试样崩解性状

图 5 为相同体积不同直径圆柱体试样崩解时程曲线。

由图 5 中曲线可以看出,相同体积相同水深情况下,细长圆柱体试样崩解时间比粗短圆柱体试样崩解时间长。相同体积圆柱体试样,直径较大的试样表面积较大,与水相互作用的表面土颗粒较多,土体易于

崩解。

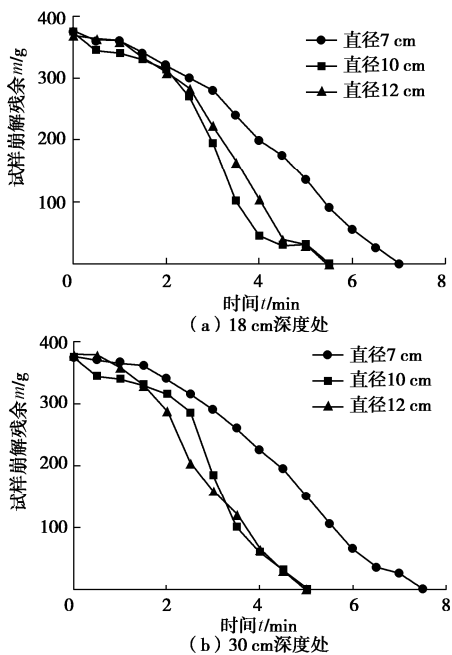


图 5 相同水深不同直径试样崩解时程曲线

Fig. 5 Disintegration curves of soil samples with same water depth and different diameters

2.4 不同含砂率试样崩解性状

图 6 是不同含砂率试样崩解时程曲线。由于崩解试验土样是完全烘干状态,水分迅速蒸发会在土样中形成裂隙通道。试样没入水中后,由于吸湿压力的作用,水很快沿裂隙通道渗入,试样先吸水增重。因此,试样崩解残余量时程曲线先上升后下降,直至试样完全崩解。

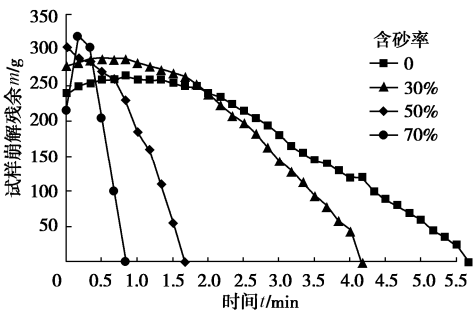


图 6 不同含砂率试样崩解时程曲线

Fig. 6 Disintegration curves of soil samples with different sand contents

由图 6 中曲线可以看出含砂率为 70% 的试样入水后试样迅速大量吸水,质量明显增加,随后质量迅速减少,试样快速崩解,崩解时间远远小于含砂率为零的下蜀土试样崩解时间;随着土中含砂率减小,试样崩解速度越来越慢。可见水的崩解作用对高含砂率边坡的破坏影响很大。

图 7 为不同含砂率试样没入水中 40 s 时试样的崩

解情况。含砂率为 0 和含砂率为 30% 的试样在水中试样外层最先崩解剥落, 逐步向内层崩解, 在每层剥落的过程中均伴有少量气泡上升出现, 试样呈鳞片状或颗粒状崩解, 崩解过程中未发生大体积崩解, 崩解速率较为平缓。含砂率为 50% 与 70% 的试样崩解过程与前两组差异较大, 试样放入水中, 试样吸水后先崩解为几个大块, 然后每个大块再崩解为更多更小的块体, 呈指数级快速崩解, 崩解时间远小于含砂率为零和含砂率为 30% 的下蜀土试样, 气泡大量出现, 水体浑浊较快。

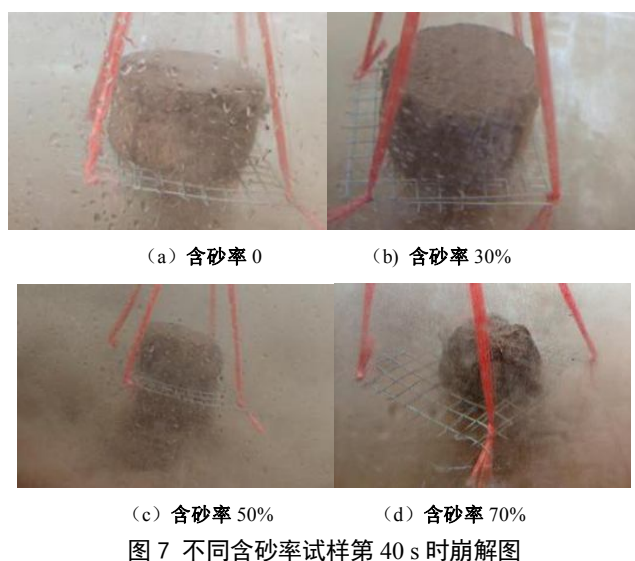


图 7 不同含砂率试样第 40 s 时崩解图

Fig. 7 Collapse of samples with different sand contents at 40 s

黏土性颗粒细小, 比表面积大, 土体受水浸润, 土体中的水与土体所含的亲水矿物发生物理化学反应, 使得土颗粒表层产生结合水膜, 土颗粒间具有较强的胶结能力, 土体黏聚力较大, 水不易渗入土体内部, 因而崩解较慢。当土体含砂率增加, 土粒粗颗粒增多, 土体性质逐渐由黏性土转变为砂性土。砂性土颗粒间无黏聚力, 渗透系数较大, 水容易渗入到土体内部。水具有较强的润滑作用, 造成砂性土颗粒间内摩擦角减小, 砂性土颗粒间孔隙较易被水填充达到饱和状态, 产生较大的孔隙水压力, 同时对土体颗粒产生浮托力, 土体抗剪强度快速降低, 因而, 随试样含砂率增加, 试样崩解增快。

### 3 土体吸水崩解机理

黏土颗粒具有高亲水性, 黏土颗粒表面吸附了一层水膜, 黏土颗粒表面水膜按顺序由强结合水、弱结合水和自由水组成, 如图 8 所示。

黏土颗粒吸附水分子, 颗粒表面形成水化膜, 黏土晶格层面间的距离增大, 产生膨胀以至分散, 土体崩解。黏土水化膨胀经历两个阶段: 表面水化膨胀阶段和渗透水化膨胀阶段。表面水化膨胀由表面水化引

起, 是短距离范围内的黏土与水的相互作用, 这个作用进行到黏土层间厚度约为  $10 \text{ \AA}$ 。此时作用的力有层间分子的范德华引力、层面正负电荷间的静电引力、水分子与层面的水化能(吸附能量), 其中水化能最大; 这 3 种力的净能量在第一层水分子进入时的膨胀力可以达到几千大气压。渗透水化膨胀由渗透水化引起, 当黏土层面间的距离超过  $10 \text{ \AA}$  时, 表面吸附能量已不在起主要作用, 此后黏土的继续膨胀由渗透压力和双电层斥力所引起。随着水分子进入黏土晶胞层间, 黏土表面吸附的阳离子便水化而扩散到水中, 形成扩散双电层, 由此, 层间的双电层斥力便逐渐起主导作用而引起黏土层间距进一步扩大。其次黏土层间吸附有众多的阳离子, 层间的离子浓度远大于溶液内部的浓度。由于浓度差的存在, 黏土层可看成是一个渗透膜, 在渗透压力作用下水分子便继续进入黏土层间, 引起黏土的进一步膨胀。由渗透水化而引起的膜膨可使黏土层间距达到  $120 \text{ \AA}$ 。黏土水化膨胀在达到平衡距离(层间距大约为  $120 \text{ \AA}$ )的情况下, 在剪切力作用下晶胞便分离, 土体崩解。

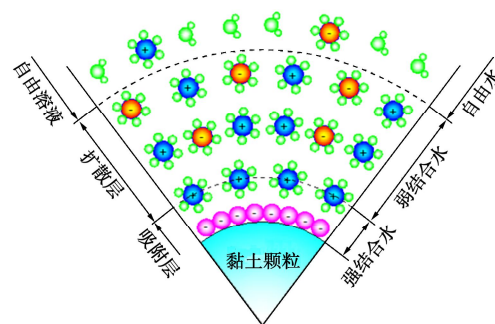


图 8 黏土颗粒表面水膜示意图

Fig. 8 Schematic diagram of water film of clay particles

### 4 结 论

(1) 水深对土体崩解具有重要影响。在相同初始条件下, 随着水深的增加, 试样的崩解速度增快。对于库岸边坡, 库水位上升后, 水面以下土质边坡, 水深越深, 孔隙渗透压越大, 边坡土体崩解越多, 导致边坡下部压重减轻, 边坡土体抗滑力减小。同时, 边坡土体浸水后, 土体抗剪强度减小。在两者共同作用下, 抗滑力小于下滑力, 边坡在水位上升情况下失稳滑塌破坏。

(2) 土体接触水的土体表面积大小是影响土体崩解的因素之一。相同体积、相同外形, 比表面积大的试样, 土体崩解速率快。

(3) 不同含砂率试样在水中的崩解性状存在较大差异, 含砂率低的试样在水中崩解速度较慢, 随着试

样含砂率的增高,试样崩解速度加快。表明土在水中的崩解作用对高含砂率边坡的破坏影响很大。土质边坡含砂率越高,边坡越易失稳破坏。

### 参考文献:

- [1] 钟立勋. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, **5**(2): 77 - 84. (ZHONG Li-xun. Enlightenments from the accident of vaiont landslide in Italy[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, **5**(2): 77 - 84. (in Chinese))
- [2] 中村浩之, 王恭先. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, **10**(1): 53 - 64. (NAKAMURA K, WANG Gong-xian. On reservoir landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, **10**(1): 53 - 64. (in Chinese))
- [3] 陈晓平. 基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, **30**(3): 77 - 83. (CHEN Xiao-ping. Overview of landslides due to reservoir impoundment based on shear strength properties of sliding zone soils[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, **30**(3): 77 - 83. (in Chinese))
- [4] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(5): 769 - 772. (LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FENG Xia-ting. Study on the Mechanism of Slope instability induced by rising Reservoir Water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(5): 769 - 772. (in Chinese))
- [5] 崔洁. 不同库水位升降速度对大坝边坡稳定性的影响研究[J]. 水利水电技术, 2017, **48**(2): 155 - 159. (CUI Jie. Study on the influence of different reservoir water level rise and fall velocity on dam slope stability[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2017, **48**(2): 155 - 159. (in Chinese))
- [6] PAN H Z, QIN R, HAN L F, et al. Analysis of the seepage velocity dynamic characteristics under reservoir water level lifting[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014(19): 6663 - 6673.
- [7] 刘博, 李江腾, 王泽伟, 等. 非饱和土渗流特性对库岸边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(2): 515 - 516. (LIU Bo, LI Jiang-teng, WANG Ze-wei, et al. The influence of the seepage characteristics of unsaturated soil on the stability of the bank slope[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014, **45**(2): 515 - 516. (in Chinese))
- [8] 简文彬, 黄聪惠, 罗阳华, 等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(4): 1 - 9. (JIAN Wen-bin, HUANG Cong-hui, LUO Yang-hua, et al. Experimental study on wetting Front Movement of residual soil on unsaturated Slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(4): 1 - 9. (in Chinese))
- [9] 袁亮. 黄土崩解特性试验研究[D]. 西安: 西北大学, 2017. (YUAN Liang. Experimental Study on Disintegration Characteristics of Loess[D]. Xi'an: Northwest University, 2017. (in Chinese))
- [10] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (TANG Da-yong, LIU You-rong, ZHANG Wen-shu, et al. Rock and Soil Engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [11] PHIENWEJ N. Ground Response and Support Performance in a Sheared Shale[D]. Urbana: University of Illinois, 1987.
- [12] MORIWAKI Y. Causes of Slaking in Argillaceous Materials[D]. Berkeley: Berkeley University of California, 1975.
- [13] 郑敏洲. 残积土的崩解特性及其土坡位移的非线性时序分析[D]. 福州: 福州大学, 2006. (ZHENG Min-zhou. Non-Linear Time-Series Analysis of Disintegration Characteristics of Residual Soil and Soil Slope Displacement[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006. (in Chinese))
- [14] 徐清扬. 影响土的崩解特性因素初步研究[C]// 中国地质学会工程地质专业委员会, 2016年全国工程地质学术年会论文集, 2016: 872 - 877. (XU Qing-yang. Preliminary research on the factors affecting soil disintegration characteristics of soil[C]// Engineering Geology Committee of Chinese Geological Society, Proceedings of the 2016 National Engineering Geology Academic Conference, 2016: 872 - 877. (in Chinese))

(编校: 孙振远)