

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.03.008

## 干湿循环作用下红砂岩堆石料力学性能研究

彭成<sup>1,2</sup>, 谢阳发<sup>1</sup>, 李安然<sup>1</sup>, 钟启明<sup>2</sup>

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210000)

**摘要:**为研究红砂岩堆石料在干湿循环作用下的力学性能,以干湿循环次数为主要变量,开展常规三轴压缩试验。研究表明:不同干湿循环次数下,红砂岩堆石料应力-应变曲线变化规律基本一致,整体呈现出明显的应变软化。应力-应变曲线在初期快速增加,直至出现峰值,而后开始降低,最后趋于稳定;相同干湿循环次数下,试样破坏强度随围压增大而逐渐增长;相同围压,破坏强度随干湿循环次数增加而逐渐降低,破坏强度与干湿循环次数呈现指数关系;当干湿循环次数增加时,试样强度指标黏聚力逐渐减小,从125.9 kPa降低到62.3 kPa,黏聚力降幅约50%,且黏聚力与干湿循环次数之间成负线性关系;与之相似,另一强度指标内摩擦角逐渐减小,但降低幅度较小,减小幅度为15%左右,与干湿循环次数呈现指数关系。

**关键词:**堆石料;干湿循环;三轴试验;抗剪强度

**中图分类号:**TU432 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0062(2022)03-0054-07

## Study on Mechanical Properties of Red Sandstone Rockfill Under Dry-wet Cycle

PENG Cheng<sup>1,2</sup>, XIE Yangfa<sup>1</sup>, LI Anran<sup>1</sup>, ZHONG Qiming<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of red sandstone rockfill under dry-wet cycles, conventional triaxial compression tests were carried out with the number of dry-wet cycles as the main variable. The results show that under different dry-wet cycles, the stress-strain curve of red sandstone rockfill is basically the same, showing obvious strain softening as a whole. The stress-strain curve increases rapidly at the initial stage until

收稿日期:2021-12-22

基金项目:水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK319008)

作者简介:彭成(1985—),男,瑶族,讲师,博士,主要从事岩土数值模拟与稳定性分析方面的研究。E-mail:uscE-monk@126.com。\*通信作者:谢阳发(1996—),男,硕士研究生,主要从事土石坝方面的研究。E-mail:xyf19960404@126.com

there is a peak, then decreases and finally tends to be stable; under the same number of dry-wet cycles, the failure strength increases gradually with the increase of confining pressure, and the failure strength decreases gradually with the increase of the number of dry-wet cycles, and there is an exponential relationship between the failure strength and the number of dry-wet cycles. When the number of dry-wet cycles increases, the cohesion of the sample strength index decreases gradually, from 125.9 kPa to 62.3 kPa, the cohesion decreases by about 50%, and there is a negative linear relationship between cohesion and the number of dry-wet cycles; similarly, the internal friction angle of another strength index gradually decreases, but the reduction is not significant, about 15%, showing an exponential relationship with the number of dry-wet cycles. The purpose of this paper is to provide a reference basis for the design, construction and safe application of earth-rockfill dams dominated by red sandstone and red clay.

**key words:** rockfill material; dry-wet cycle; triaxial test; shear strength

## 0 引言

我国已建和在建的近百座百米级以上高土石坝大多位于西部地区,由于西部水电大开发和南水北调西线工程的开展,还将要兴建一大批高土石坝。随着土石坝技术的不断发展,拟建土石坝坝高越来越高,如何因地制宜地采用坝址区附近的堆石料已成为筑坝需要普遍考虑的问题。压缩后的土石混合料具备较高的强度、较小的变形以及良好的渗透性等优点,在高土石坝、高填方路基等工程建设中得到广泛应用。在土石坝与路基建造成等工程建设中,由于地下水位上升渗入到土体引起土体的湿化变形及其造成的附加危害越来越受到岩土界的重视。

目前国内外许多学者对堆石料等软质岩的崩解性、软化性、强度衰减等力学性能进行了大量相关研究,并取得了一定的成果。通过对干湿循环后试样开展三轴试验,并引入本构模型,建立了一系列本构关系<sup>[1-6]</sup>。同时通过电镜扫描等技术,探究干湿循环作用下试样劣化机理,验证了微裂隙的扩展延伸是试样劣化的主要原因<sup>[7-9]</sup>。为了更全面地了解干湿循环作用下碎石土的力学性能,采用试验模拟相结合的方法进一步研究了碎石土的力学性能变化规律<sup>[10-12]</sup>。固化剂、粉煤灰和石灰等改良剂通过形成胶结物质,极大地改良了干湿循环作用下堆石料的力学性能<sup>[13-16]</sup>。

综上所述,对于以变形控制为主的土石坝,反映实际环境变化条件下的红砂岩与红黏土为主的堆石料反复浸水湿化压缩以及湿化变形规律鲜有报道。为此,针对西南部湿润多雨的气候以及山

地丘陵地形条件,开展不同干湿循环条件下红砂岩堆石料的三轴压缩试验,研究其湿化变形特性、刚度衰减规律和干湿劣化机理,以便为红砂岩与红黏土为主的土石坝设计、施工及安全运用提供参考依据。

## 1 干湿循环作用下堆石料三轴试验

### 1.1 试样制备

本试验采用材料主要为红黏土和红砂岩碎石,如图1所示。红黏土与红砂岩均取自岳阳市华容县沙河水库库区,土样最大粒径为48 mm,含石量为60%左右,对最大颗粒采用缩尺进行试验。根据土/石阈值定义,以2 mm作为土粒和碎石的粒径界限。将原状红砂岩捣碎,过2 mm筛,试验主要取2 mm以上的红砂岩碎石与红黏土按照最新土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)制成标准试样( $D=39.1$  mm,  $H=80$  mm),红砂岩碎石含量为60%,试样及土石颗粒级配曲线如图2~图3所示。

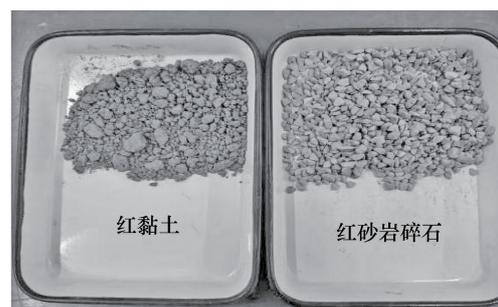


图1 试验材料

Fig.1 Test materials



图2 试样图片

Fig.2 Sample picture

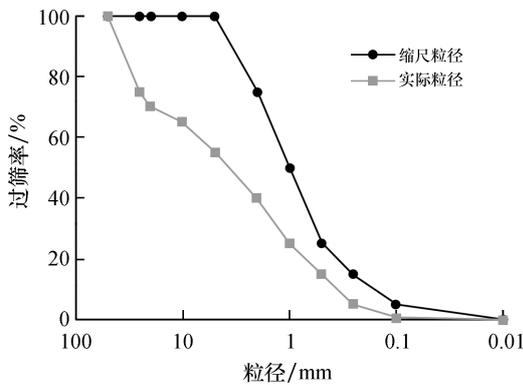


图3 试样中红砂岩颗粒级配

Fig.3 Grain gradation of red sandstone in samples

### 1.2 试验仪器

利用 TSZ 全自动三轴仪开展室内三轴试验(见图4)。



图4 TSZ 全自动三轴仪

Fig.4 TSZ automatic triaxial apparatus

TSZ 全自动三轴仪主要由主机、压力室和控制台组成。开展三轴试验时,用橡胶膜包裹试样,固定在压力室中并注满水,然后对土样施加固定的围压和反压,之后工作台以一定的速率上升,直至土样破坏。试验中,对土样施加的围压和反压,是以水为介质,由主机设定力值,通过传感器反馈控制电动调压筒调压,量力环量测对土样施

加的轴向力。孔隙水压力通过压阻式传感器跟踪测量,数字自动显示在主机面板上,土样受压后的轴向变形量由百分表测量,通过轴向变形来确定应力变化。

### 1.3 试验方案

本试验主要研究不同干湿循环次数下红砂岩堆石料的力学性能。共 15 个试样,分为 5 个小组,每组 3 个试样,每组分别进行 0、2、4、6 和 8 次不同循环次数的干湿循环试验,之后分别在 100、200 和 300 kPa 不同围压下进行不固结不排水三轴试验(见表 1)。

表 1 三轴试验分组设计表

Table 1 Triaxial test grouping design table

分组	干湿循环次数	围压/kPa
1	0	100、200、300
2	2	100、200、300
3	4	100、200、300
4	6	100、200、300
5	8	100、200、300

### 1.4 试验步骤

1) 制样:根据级配曲线,称取适量红砂岩碎石与土样,分 3 层放入三轴制样器击实,制成标准试样( $D=39.1\text{ mm}$ , $H=80\text{ mm}$ ),红砂岩碎石含量为 60%。

2) 干湿循环:将 5 组试样分别进行 0、2、4、6 和 8 次干湿循环,在 60 °C 下烘干 12 h 和真空饱和 12 h 为一次干湿循环。

3) 剪切:将干湿循环后的试样进行三轴压缩试验,控制轴向应变为 20%,剪切速率为 0.8 mm/s,围压设为 100、200 和 300 kPa。

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力-应变分析

应力-应变关系曲线可以反映土体的变形和强度特性。堆石料试样在不同围压和不同干湿循环作用次数下的应力-应变曲线如图 5 ~ 图 6 所示。在不同围压和不同干湿循环次数下,试样的应力-应变曲线变化趋势基本保持一致,整体呈现出明显的应变软化。相同围压下,随着干湿循环次数增大,试样峰值应力逐渐减小;同一干湿循环次数时,围压越大,试样峰值应力越大。试样的应力-应变曲线可大致分为三个阶段。

1) 弹性阶段:该阶段主要发生在 0% ~ 2% 应变之间。此时试样内部结构均匀完整,颗粒紧密接触,并且试样所受剪力较小,还不足以破坏试样内部结构,引起颗粒滑移与错动,变形以弹性变形为主。当应变增大时,应力迅速增加,呈现出一条直线形式。

2) 破坏阶段:随着试样受到剪切力越来越大,颗粒之间的接触力不足以克服剪切力,此时试样颗粒之间有发生错动的趋势。最终当剪切力大

于颗粒之间的相互作用力时,试样发生错动,遭到破坏,此时应力-应变曲线达到峰值。

3) 残余强度阶段:当剪切力超过抗剪强度时,颗粒会发生相对滑移与错动,但试样内部颗粒之间的摩擦力会变大,因此试样依然能够承担较大的剪切力,即残余强度。随着应变的增大,应力逐渐减小,直至减小到与残余强度相同,此时,应力-应变曲线趋于平缓。

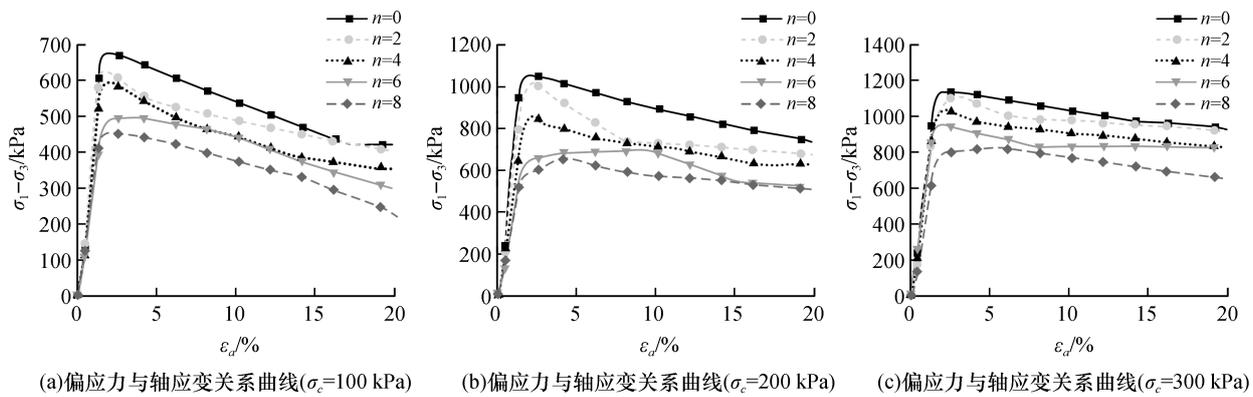


图 5 不同围压下偏应力与轴应变关系曲线

Fig. 5 The curve of the relationship between partial stress and axial strain under different confining pressure

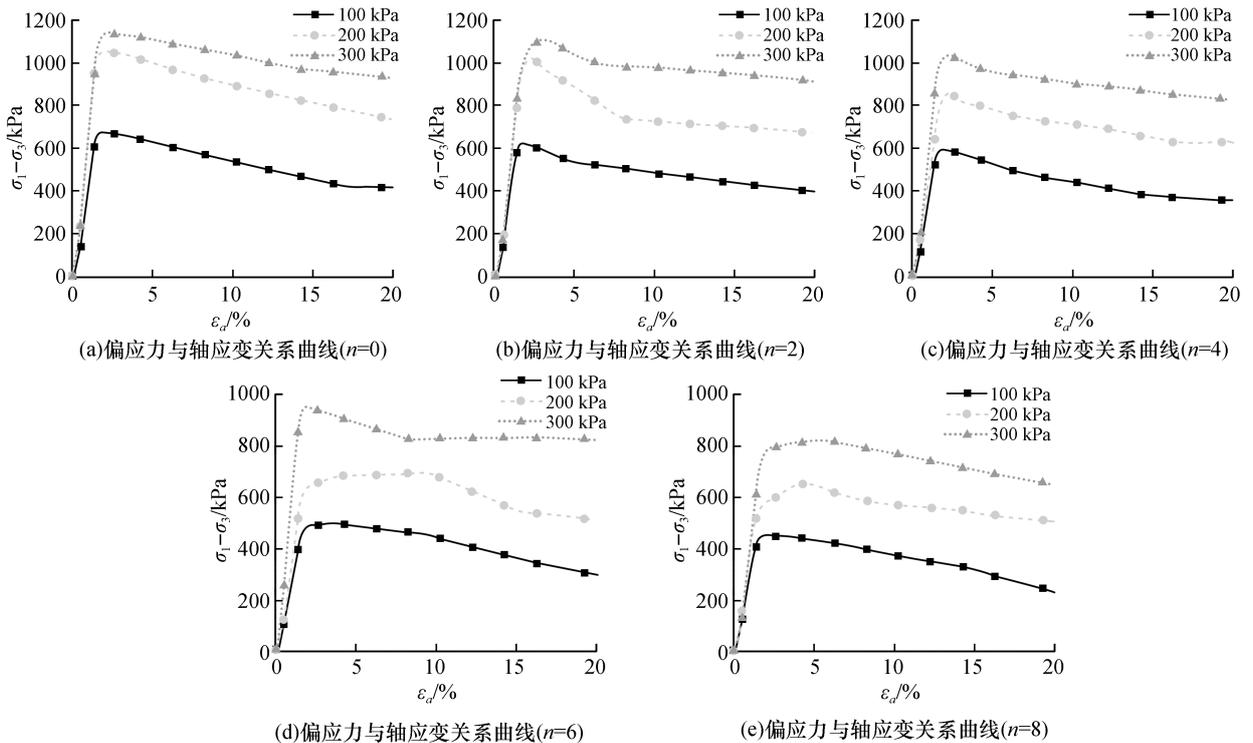


图 6 不同干湿循环次数下偏应力与轴应变关系曲线

Fig. 6 The curve of the relationship between partial stress and axial strain under different dry-wet cycles

### 2.2 破坏强度

不同干湿循环次数下红砂岩堆石料试样的破坏强度取应力-应变曲线的峰值点。不同围压下试样破坏强度与干湿循环次数关系曲线如图 7 所示。

干湿循环次数越多,试样的内部结构破坏越大,结构均匀完整性越差,颗粒间咬合力越小,越容易被克服,导致试样破坏强度越小。因此在相同围压下,随着干湿循环次数增多,破坏强度逐渐减小;而围压越大,试样被挤压得越密实,颗粒之间相互作用力就越大,发生错动就越困难,破坏强度就越大。因此相同干湿循环次数下,围压越大,破坏强度越大。

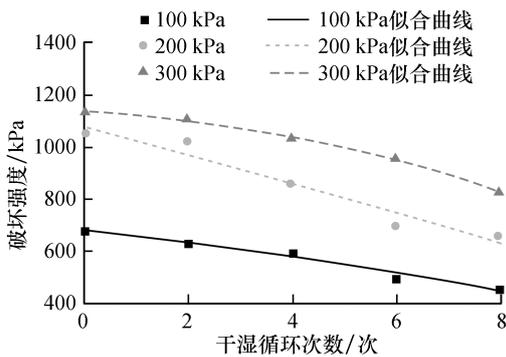


图 7 不同围压不同干湿次数下破坏强度

Fig. 7 Failure strength under different confining pressure and different dry and wet times

对试样的破坏强度与干湿循环次数进行非线性拟合,得到不同围压下试样破坏强度与干湿循环次数的函数变化关系,如式(1)所示。

$$\sigma_b = ae^{-\frac{n}{t}} + m \quad (1)$$

式中: $\sigma_b$  为试样破坏强度; $n$  为干湿循环次数。

由拟合函数可知,随着干湿循环次数的增加,试样破坏强度的降幅逐渐减小,干湿循环作用对试样的破坏效应逐渐降低,当  $n$  到达一定值时,试样内部微裂隙扩展延伸到一定程度,干湿循环作用对试样的破坏累积程度不再增大。

参数  $a, t, m$  及相关系数  $R^2$  的值详见表 1 所示。

表 2 参数  $a, t, k$  及  $R^2$  取值  
Table 2 Value of  $a, t, k$  and  $R^2$

围压/kPa	参数			
	$a$	$t$	$m$	$R^2$
100	-333.53	-15.18	1 009.53	0.981
200	-5 698.02	-105.58	6 775.11	0.952
300	-90.70	-5.31	1 229.16	0.998

### 2.3 抗剪强度指标

莫尔-库仑准则是应用最广泛的土体抗剪强度理论,黏聚力和内摩擦角可以用来表征抗剪强度。

#### 2.3.1 黏聚力

黏聚力反映了土壤颗粒之间的各种物理化学力,包括库仑力、范德华力和弯曲力,量值取决于颗粒之间分子引力的强弱。随着干湿循环次数的增加,试样内部结构完整性下降和颗粒破碎程度增加,颗粒之间的相互作用力降低,导致黏聚力下降,依次减幅约 6.78%。黏聚力与干湿循环次数关系曲线如图 8 所示。

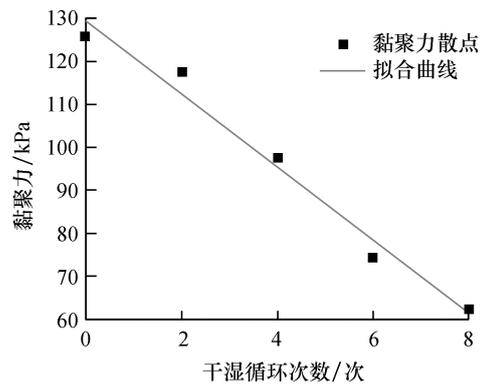


图 8 不同干湿循环次数下的黏聚力

Fig. 8 Cohesion under different dry-wet cycles

对黏聚力与干湿循环次数关系进行线性拟合,相关系数为 0.980,得到函数关系式如式(2)所示。

$$c = -8.53n + 129.64 \quad (2)$$

式中: $c$  为黏聚力, $n$  为试样的干湿循环次数。

由拟合函数可知,随着干湿循环次数的增加,黏聚力降幅稳定。黏聚力由原始黏聚力和固化黏聚力构成,在干湿循环作用下,土颗粒间胶结物质遭到持续性破坏,原始黏聚力降低,而微裂隙的扩展延伸,导致颗粒间接触面积减少,固化黏聚力降低。

#### 2.3.2 内摩擦角

土的内摩擦角反映土的摩擦阻力,包括土颗粒之间产生相互滑动时产生的滑动摩擦,以及由于土颗粒物脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦,内摩擦角与摩擦阻力成正相关关系。

$$\mu = \mu_{\text{滑动}} + \mu_{\text{咬合}} \quad (3)$$

式中: $\mu$  为摩擦阻力, $\mu_{\text{滑动}}$  为滑动摩擦, $\mu_{\text{咬合}}$  为咬合摩擦。

随着干湿循环次数的增加,试样的内部结构逐渐破坏,发生滑移错动时受到的 $\mu_{\text{滑动}}$ 和 $\mu_{\text{咬合}}$ 均减小,因此 $\mu$ 亦减小,所以红砂岩堆石料试样内摩擦角随干湿循环次数的增加而降低。由 $36.2^\circ$ 减小到 $30.8^\circ$ ,减小幅度约为15%。红砂岩堆石料试样的内摩擦角与干湿循环次数关系曲线如图9所示。

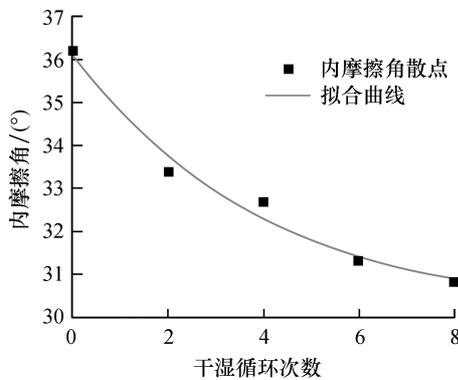


图9 不同干湿循环次数下的内摩擦角

Fig. 9 Internal friction angle under different dry-wet cycles

对试样内摩擦角与干湿循环次数进行非线性拟合,相关性系数为0.983,得到内摩擦角与干湿循环次数的函数变量关系如式(4)所示。

$$\varphi = be^{-\frac{n}{t_0}} + m_1 \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为试样的内摩擦角, $n$ 为试样干湿循环次数, $b$ 取6.11, $t_0$ 取4.07, $m_1$ 取30.00。

由拟合函数可知,试样内摩擦角降幅随干湿循环次数的增加而降低。由于水的浸滤作用,试样大颗粒减少,小颗粒增加,咬合摩擦降低,当到达一定程度时,颗粒粒径保持稳定,内摩擦角几乎保持不变。

### 3 结 论

以红砂岩堆石料为研究对象,开展干湿循环试验与常规三轴压缩试验(UU),并分析了红砂岩堆石料在干湿循环作用下的力学性能,探寻了干湿循环作用引起红砂岩堆石料强度衰减过程的内在机理,主要研究结果如下:

1)在不同干湿循环次数作用下红砂岩堆石料试样的应力-应变曲线变化规律基本一致,整体呈现出明显的应变软化。随着应变的增加,应力逐渐增大,达到峰值后缓慢减小,最后趋于稳定。应力-应变曲线分为弹性阶段、破坏阶段和残余强

度阶段。

2)相同干湿循环次数下,试样破坏强度随围压增加而逐渐增大;相同围压,破坏强度随干湿循环作用次数增加而逐渐降低,破坏强度与干湿循环次数呈现指数关系。

3)当干湿循环次数增加时,试样抗剪强度指标黏聚力逐渐减小,从125.9 kPa降低至62.3 kPa,黏聚力降幅约50%,且黏聚力与干湿循环次数之间成负线性关系;与之相似,另一抗剪强度指标内摩擦角随干湿循环次数的增加而逐渐减小,但降低幅度不大,降幅为15%左右,与干湿循环次数呈现指数关系。

### 参考文献:

- [1] 方瑾瑾,杨小林,冯以鑫,等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(5):1043-1055.
- [2] 方瑾瑾,冯以鑫,王立平,等. 真三轴条件下非饱和黄土的有效应力屈服特性[J]. 岩土力学,2020,41(2):492-500.
- [3] 郝延周,王铁行,程磊,等. 考虑干湿循环影响的压实黄土结构性本构关系[J]. 岩土力学,2021,42(11):1-10.
- [4] 陈开圣. 干湿循环下压实红黏土三轴试验[J]. 公路,2017,62(11):215-220.
- [5] ZHANG Q S,JI T J,XIAO L. Law of water content change in subgrade soil under action of dry-wet cycle[J]. Transactions of Nanjing university of aeronautics and astronautics,2021,38(增刊):69-75.
- [6] ZHU R,CAI Z Y,HUANG Y H, et al. Centrifugal and field studies on water infiltration characteristics below canals under wetting-drying-freezing-thawing cycles[J]. Journal of central south university,2021,28(5):1519-1533.
- [7] WU H L,JIN F,DU Y J. Influence of wet-dry cycles on vertical cutoff walls made of reactive magnesia-slag-bentonite-soil mixtures[J]. Journal of Zhejiang university-science A ( applied physics & engineering ), 2019, 20(12):948-960.
- [8] LI Y,YING S P,LV H L. Performance of interface between TRC and existing concrete under a chloride dry-wet cycle environment[J]. Journal of central south university,2020,27(3):876-890.
- [9] CHEN W,LI G W,HOU Y Z, et al. Determining representative elementary volume size of in-situ expansive soils subjected to drying-wetting cycles through field test [J]. Journal of central south university,2021,28(10):3246-3259.

(下转第112页)

- of connected regions in automatic image annotation based on multi-label learning [J]. *Neurocomputing*, 2017, 228: 11-18.
- [6] WANG X, SUKTHANKAR G. Multi-label relational neighbor classification using social context features [C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. New York, USA: ACM, 2013: 464-472.
- [7] DUDA R O, HART P E, STORK D G. *Pattern classification* [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2001: 25-68.
- [8] PAWLAK Z. *Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991: 32-58.
- [9] 段洁, 胡清华, 张灵均, 等. 基于邻域粗糙集的多标记分类特征选择算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52 (1): 56-65.
- [10] LI H, LI D, ZHAI Y, et al. A novel attribute reduction approach for multi-label data based on rough set theory [J]. *Information sciences*, 2016, 367-368: 827-847.
- [11] LIN Y, LI Y, WANG C, et al. Attribute reduction for multi-label learning with fuzzy rough set [J]. *Knowledge-based systems*, 2018, 152: 51-61.
- [12] LI Y, LIN Y, LIU J, et al. Feature selection for multi-label learning based on kernelized fuzzy rough sets [J]. *Neurocomputing*, 2018, 318: 271-286.
- [13] FAN X, CHEN Q, QIAO Z, et al. Attribute reduction for multi-label classification based on labels of positive region [J]. *Soft computing*, 2020, 24 (18): 14039-14049.
- [14] QIAN W, HUANG J, WANG Y, et al. Label distribution feature selection for multi-label classification with rough set [J]. *International journal of approximate reasoning*, 2021, 128: 32-55.
- [15] LIANG J, QIAN Y, CHU C, et al. Rough set approximation based on dynamic granulation [J]. *Rough sets, fuzzy sets, data mining, and granular computing*, 2005, 3641: 701-708.
- [16] GHAMRAWI N, MCCALLUM A, NADIA G, et al. Collective multi-label classification [C]//Proceedings of the 2005 ACM conference on information and knowledge management. Bremen, Germany: ACM, 2005: 195-200.
- [17] JESSE R. Scalable multi-label classification [D]. New Zealand, Hamilton: University of Waikato, 2010: 1-53.
- [18] SHAO H, LI G, LIU G, et al. Symptom selection for multi-label data of inquiry diagnosis in traditional Chinese medicine [J]. *Science China information sciences*, 2013, 56 (5): 1-13.
- [19] POLKOWSKI L. On convergence of rough sets [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992: 305-311.
- [20] QIAN Y, LIANG J, DANG C. Converse approximation and rule extraction from decision tables in rough set theory [J]. *Computer and mathematics with applications*, 2008, 55: 1754-1765.
- [21] QIAN Y, LIANG J, PEDRYCZ W, et al. Positive approximation: An accelerator for attribute reduction in rough set theory [J]. *Artificial intelligence*, 2010, 174 (9/10): 597-618.
- [22] 徐章艳, 刘作鹏, 杨炳儒, 等. 一个复杂度为  $\max(O(|U||C|), O(|C|^2|U/C|))$  的快速属性约简算法 [J]. *计算机学报*, 2006, 29 (3): 391-399.

(上接第59页)

- [10] 董辉, 罗潇, 罗正东, 等. 碎石土三轴测试仿真建模及试样尺寸效应分析 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (1): 104-113.
- [11] 马石城, 胡军霞, 马一跃, 等. 基于三维离散元堆积碎石土细-宏观力学参数相关性研究 [J]. *计算力学报*, 2016, 33 (1): 73-82.
- [12] 董辉, 陈玺文, 傅鹤林, 等. 堆积碎石土剪切特性的三轴试验 [J]. *长安大学学报(自然版)*, 2015, 35 (2): 59-66.
- [13] 孙雅珍, 李凯翔, 丁传超, 等. 稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究 [J]. *中外公路*, 2018, 38 (1): 248-253.
- [14] 苏立君, 梁双庆, 王洋. 震后降雨型碎石土斜坡稳定性的试验研究 [J]. *工程科学与技术*, 2019, 51 (4): 12-20.
- [15] 梁双庆, 苏立君. 不同地下水位碎石土斜坡对震动的差异性动力响应 [J]. *山地学报*, 2018, 36 (1): 83-90.
- [16] 吴锐, 邓清禄, 付敏, 等. 碎石尺寸对碎石土强度影响的大型直剪试验研究 [J]. *长江科学院报*, 2016, 33 (8): 80-85.