

DOI: 10.11779/CJGE201910019

崩解泥化过程中泥岩强度衰减因素研究

曹雪山^{1, 2}, 额力素¹, 赖喜阳¹, 周 赛¹, 李国维^{1, 2}, 袁俊平², 吴建涛^{1, 2}

(1. 河海大学道路与铁道研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 崩解是泥岩的基本特性, 是土体的主要形成方式。受自然气候的干湿循环作用影响, 泥岩崩解、泥化, 引发了许多边坡坡面剥蚀及边坡失稳问题。因此研究泥岩在崩解泥化过程中强度衰减的影响因素具有重要的工程意义。以引江济淮试验工程的河道边坡下部低强度、弱膨胀的红层泥岩为研究对象, 提出了自然约束的崩解试验研究方法, 对于干湿循环过程中泥岩试样的裂隙开展, 颗粒组分, 耐崩解比, 剪切强度及强度指标等参数进行了研究。研究表明: 干湿循环效应存在临界次数。在7次干湿循环前, 泥岩试样的参数变化显著, 有裂隙增长、细颗粒含量比例增加, 耐崩解比、剪切强度及强度指标的减小。7次干湿循环后, 这些参数变化均不明显。崩解物的耐崩解性变化特征与完全崩解颗粒粒径阈值 D_{cr} 无关, 耐崩解指数 I_{Di} 及耐崩解率 D_R 减小特征趋势相同。泥岩崩解物的强度指标与耐崩解率 D_R 呈现很高的正相关性。这些说明干湿循环为诱发岩石崩解的因素, 对强度衰减起作用的是试样的颗粒组成与状态变化, 耐崩解率是颗粒组成与状态的量化指标。

关键词: 泥岩; 干湿循环; 强度衰减; 侧限崩解试验; 崩解性状

中图分类号: TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)10-1936-07

作者简介: 曹雪山(1970—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事非饱和土固结、土石坝数值计算、泥质岩崩解特性及地基与基础工程、地基处理等教学与研究。E-mail: x.s.cao@163.com。

Factors for strength attenuation of mudstone during slaking and disintegration

CAO Xue-shan^{1, 2}, E Li-su¹, LAI Xi-yang¹, ZHOU Sai¹, LI Guo-wei^{1, 2}, YUAN Jun-ping², WU Jian-tao^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Slaking, a common engineering characteristic, is the main weathering mode from clay-bearing rocks to soils. Due to the influences of wetting-drying cycles of natural climate, mudstone can slake and disintegrate into the grains with different sizes, which cause numerous problems of erosion and slope instability. Thus, studying the influence factors for the strength attenuation of mudstone in the process of slaking and disintegration is of great engineering significance. On the basis of the red mudstone with low strength and weak expansion in the lower part of the waterway slope in the in-situ test project of the water diversion of the Yangtze River to Huaihe River in China, a method for disintegration tests regarding natural constrained condition is developed to study the variation characteristics of fracture development, particle composition, disintegration ratio, shear resistance and strength parameters. The results show that there is a critical number of wetting-drying cycle effects. Before the seventh wetting-drying cycle, the parameters of mudstone samples change significantly, including increase of fissures, percentage of fine particles, reduction of disintegration ratio, reduction of shear resistance and reduction of strength parameters. After the seventh wetting-drying cycle, the changes of these parameters are not obvious. The characteristics of the disintegration behaviors are independent of the critical grain size D_{cr} of the complete disintegration, and the decreasing trends of the disintegration index I_{Di} and disintegration ratio D_R are similar. The highly positive correlation between the strength parameters and the disintegration ratio D_R indicates that wetting-drying cycles are the factor that induces rock slaking, and the particle composition and state changes of samples play a role in the strength attenuation, and the disintegration resistance rate is a quantitative index of particle composition and state.

Key words: mudstone; wetting-drying cycle; strength attenuation; confined disintegration test; disintegration

0 引言

崩解是泥岩的基本特性。由于含有大量黏土矿物成分, 泥岩对环境水分变化相当敏感。受自然气候的

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0404800); 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0404801, 2017YFC0404804)

收稿日期: 2018-11-07

干湿循环作用影响, 泥岩吸水后崩解、泥化, 形成大小不同的颗粒。这不仅强化了崩解物的土体性质, 还可引发了泥岩边坡的坡面剥蚀及边坡失稳等工程问题^[1]。Irsyam等^[2]认为Tulis水电建设过程中诸多边坡失稳是由于挖掘和逐渐崩解, 岩石抗剪强度衰减所导致。Lin等^[3]研究了第三纪砂岩微观力学机理, 认为干湿循环导致砂岩单轴抗压强度下降。刘新荣等^[4]认为干湿作用促进了泥质岩结构体内裂隙、空洞的产生、发展, 使完整砂岩强度呈下降规律。权全等^[5]认为耐崩解指数随着干湿循环次数增加而减小。Koncagul等^[6]认为耐崩解指数与无侧限强度存在正相关性。因此, 确定崩解、泥化过程中泥岩强度衰减规律, 分析相关因素, 对泥岩边坡设计具有重要的工程意义。

岩石耐崩解能力通常是由耐崩解试验测试的。该方法1972年由Franlin等^[7]提出, 是国际广泛应用的一种方法^[8-9]。该试验是采用岩石耐崩解性仪, 试样要求是试件不少于10个, 规格40~60 g, 浑圆状; 在100°C~105°C的温度下烘干至恒重, 冷却至室温; 将试样装入圆柱形筛筒中, 再将筛筒放在水槽内浸水, 筛筒以20 r/min的转速转动10 min后, 烘干至恒量, 完成一个循环。以二次干湿循环后残留在筛筒(筛孔2 mm)的颗粒占原试样的干质量比值百分数计算耐崩解性指数 I_{d2} 。

尽管耐崩解性试验方法简单方便, 但该试验方法仍有不少缺点难以克服。①机械破碎干扰。耐崩解性试验的筛筒转动过程中样品之间及其与筛表面的碰撞而产生的机械破碎。②试样形状问题。样品块要求为浑圆状, 受岩石不连续面影响制样困难, 且崩解过程难免尖角薄边不出现^[10]。③判别标准的工程意义不明。仅取用大于筛孔2 mm的含量计算耐崩解指数^[7], 进而将比2 mm大的岩样崩解碎片均视为未崩解物, 欠合理的^[11]。④室内试验成果无法与现场崩解现象、现场崩解实测值对应^[12]。实际工程中泥岩均围岩自然约束, 经历着现场气候条件引发的水分变化过程。

综上, 本文以引江济淮试验工程的河道边坡下部低强度、弱膨胀的红层泥岩为研究对象, 提出了考虑自然约束条件的崩解试验研究方法, 研究了干湿循环过程中裂隙开展、崩解颗粒演化及强度变化, 揭示了崩解作用是强度衰减的内在因素, 为崩解性泥质岩边坡稳定性设计与施工提供技术支持。

1 试验样品特征

根据引江济淮试验工程地质勘察报告, 河道下部揭露的是白垩系(K)泥岩。如图1(a)所示, 地层

岩性、颜色及结构构造特征等方面都比较稳定; 作为白垩系(K)内陆湖相沉积, 成岩度不高, 兼有土、岩的部分工程特征, 可称为半成岩^[13]。

如图1(b)所示的开挖揭露的新鲜泥岩, 具有显著的岩性结构特征: 清晰的层面、发育的结构面, 平滑断口, 致密的结构。图1(c)所示的泥岩在自然气候条件下已经碎裂化, 崩解显著, 显示了土性特征。

研究试样为新鲜泥岩原状样, 取自于引江济淮试验工程K42+040, 渠道中部位置, 深度12~13 m。试样呈红色、红褐色, 密实, 具有明显的水平层理, 结构面光滑, 密闭, 局部发育, 不规则, 节理面上有黑色的铁锰结核膜, 薄层-厚层。表1和表2分别展示了现场泥岩的基本物理指标和由XRD矿物鉴定试验确定的泥岩矿物含量。



(a) 河道边坡泥岩分布



(b) 开挖揭露的新鲜泥岩



(c) 崩解后的泥岩

图1 引江济淮试验工程河道边坡泥岩场地特征

Fig. 1 Waterway slope in in-situ test project of water diversion of Yangtze River to Huaihe River

表1 岩样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of rock samples

干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	孔隙比	自由膨 胀率/%	抗压强 度/MPa	耐崩解数 $I_{d2}/\%$
1.62~1.69	18.6~24	0.53~0.6	51	1.1	2.5

表2 泥岩矿物组分

Table 2 Mineral composition of mudstone sample

石英 /%	赤铁矿 /%	蒙脱石 /%	钠长石 /%	白云母 /%	微斜长石 /%
20.50	3	20.81	11.79	36.52	6.97

2 自然约束的崩解试验研究方法

现有的耐崩解性试验方法中, 试样在干湿循环过程中自由、无约束, 发生崩解、碎裂化, 破坏了试样形状, 无法进行后继的强度试验以明确崩解物的强度指标。为此本文提出了环刀固定试样形状的崩解试验方法, 通过固定初始干密度的方法模拟实际工程中岩石的自然约束状态。对于某一深度的岩土体, 在自然约束条件下因裂隙面水分蒸发而收缩, 裂隙张开、发展; 因裂隙浸水而膨胀闭合裂隙, 为此岩土体的胀缩变形很有限(如由收缩裂隙、原生裂隙等所组成的裂隙空间), 自然密度变化基本可忽略不计, 但这并不能阻止裂隙发展。由此岩土体的自然密度是体现自然约束程度的重要特征指标。另外, 考虑崩解后的岩石试样是松散物集合体, 强度值测定时参考了《土工试验方法标准》^[14]。

本方法的关键点是采用环刀固定试样体积形状, 难点是制作环刀试样。试样为半成岩, 其内部有不连续结构面, 制作时应特别小心。按照常规岩土试验原状样试件制备过程, 分现场取试块样, 实验室削制环刀试样两个阶段。在干湿循环及直剪试验过程中, 本法采用叠式饱和器支架安装固定试样, 既方便于多个试样饱和, 也方便拆卸成单个试样。干湿循环过程分为湿化和干燥两个过程。湿化过程为将装有试样的饱和器置于密封容器内抽气2 h 浸水饱和24 h; 干燥过程将试样从饱和器上拆开, 试样分开、并排侧立放置在自制低温烘箱内, 温度控制为40°C, 湿度为70%, 持时6 h。根据试验方案, 如表3, 每组试验有5个试样, 在干湿循环次数达到后, 取4个试样, 参考《土工试验方法标准》^[14], 进行抽气2 h 后浸水饱和24 h, 制作饱和直剪试验试样, 利用DZ-4型应变控制式直剪仪, 进行直剪强度试验。试样每产生剪切位移0.2~0.4 mm 测记测力计和位移读数一次, 直至测力计读数出现峰值。此时应继续剪切至剪切位移4 mm 时停机。取1个试样进行静止崩解试验, 主要步骤如下:

(1) 将试样放置在孔径5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.075 mm 的标准筛上, 置入盛水试验容器, 水面高度与环刀顶平齐, 静置24 h, 如图2所示。

(2) 将容器内水抽干, 取出泥岩环刀样的崩解物与标准筛, 一起放入烘箱内烘干24 h。然后取出并冷却至室温后称重。

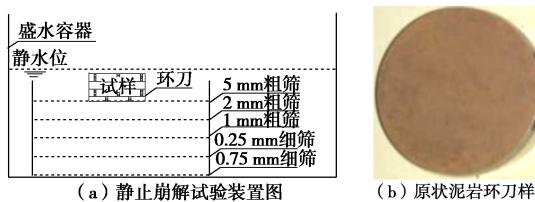


Fig. 2 Disintegration tests regarding natural constrained condition

表3 干湿循环直剪、崩解试验方案

Table 3 Scheme of direct shear and disintegration tests under wetting-drying cycles

编号	含水率 /%	干密度 /(g·cm⁻³)	环境温度 /°C	环境湿度 /%	干湿循环次数
1~40	22.3	1.56	40	70	0, 1, 3, 5, 7, 10, 20, 30

3 试验结果与分析

3.1 干湿循环过程中裂隙发育特征

图3展示了环刀样上表面在风干1~30次后裂隙发展过程。图3(a)试样表面裂隙不显著, 这与首次风干条件(温度40°C, 湿度70%)相应。随着干湿循环次数的增加, 裂隙宽度、长度及密度均有所增长。殷宗泽等^[15]分析了裂隙发展机理, 认为竖向裂隙面形成后, 一则原有裂隙成了蒸发面, 加剧了深度方向横向收缩量, 使裂隙向深度发展; 另一方面, 横向收缩不均也引起横向裂隙。裂隙将泥岩试样分割成体积各异的块状体。在干湿循环过程中, 裂隙发展包括泥岩内部微裂隙的扩展和新生裂隙的增多。干燥泥岩吸水饱和, 裂隙由于矿物膨胀而闭合, 但是裂隙处结构强度不可能得到完全修复。泥岩在宏观上膨胀、收缩变形可逆, 但在微观上部分变形不可逆^[16]。因此, 当试样再次放置在温度40°C, 湿度为70%的条件下干燥时, 之前闭合的裂隙也会重新张开, 并且进一步开展, 产生更多数量的次生新裂隙。如此经历多次干湿循环作用后, 在泥岩试样表面逐渐形成密集的裂隙网。试样表面裂隙网反映了泥岩内部颗粒破碎的产生。

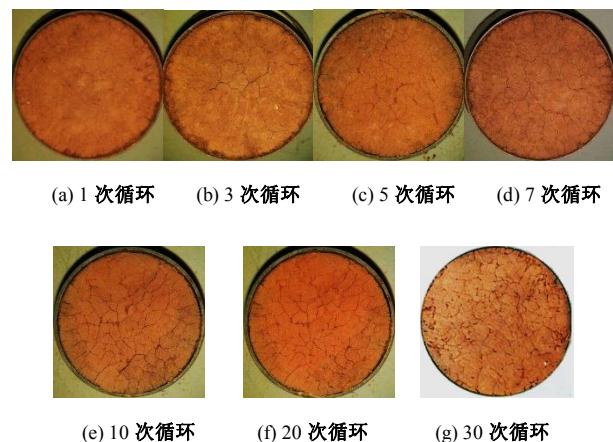


图3 干湿循环条件下裂隙发育过程

Fig. 3 Fissure development under wetting-drying cycles

借助图像辅助软件对泥岩裂隙表面图像进一步处理, 以定量描述泥岩试样表面裂隙发育特征。我们在photoshop中用直径375(像素点个数)的圆截取环刀内裂隙照片, 对应圆的真实直径为61.8 mm, 等于环刀内径, 此时环刀内图像像素总数为110446。在图像

中选择裂隙像素以统计其总数。裂隙度是裂隙像素总数与试样表面像素总数的比值, 变化过程如图7所示。第1次风干后, 裂隙度为2.1%; 随着干湿循环次数的增加, 裂隙度快速增大, 第7次风干裂隙度为6.1%, 为1次风干后的2.9倍。此后裂隙度较为平稳, 第30次风干后为6.7%, 为1次风干后的3.2倍。这说明泥岩裂隙发展过程存在临界干湿循环次数。

3.2 泥岩崩解物颗粒组分变化特征

泥岩崩解物是泥岩崩解碎化后的松散物集合体, 即为土体。在持续的干湿循环作用下, 崩解作用使颗粒内部胶结连接不断发生新的断裂, 形成新的更细颗粒。由图4所示, 随着干湿循环次数增加, 泥岩崩解物颗粒粒径分布曲线向下移动, 表明细颗粒比例增加, 粗颗粒减少; 第7次干湿循环之后, 泥岩崩解物粒径大于2 mm的颗粒消失。崩解物颗粒组分特征展示了试样的颗粒组成与状态。

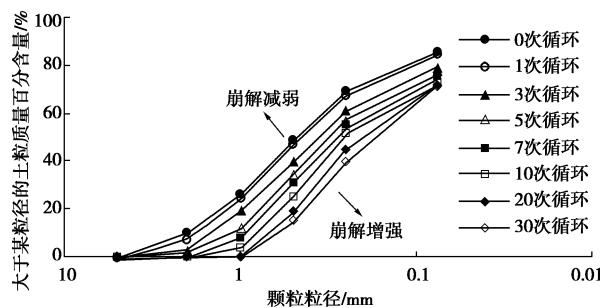


图4 崩解物颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of slaking mudstone

3.3 评价崩解物颗粒组成的耐崩解性指标

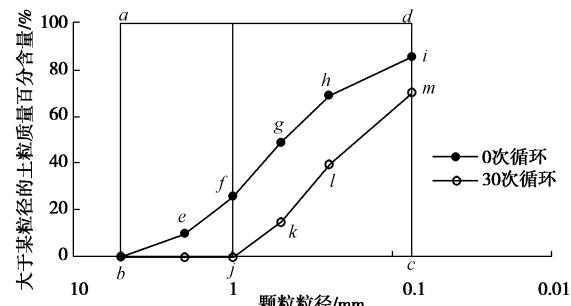
二次循环耐崩解指数(I_{d2})^[7-9]和耐崩解率^[17]是泥岩耐崩解性量化分析的两种指标。前者属于耐崩解试验的参数, 试验的筛孔直径2 mm。认为所有颗粒均大于2 mm时 I_{d2} 的值为100%, 表示该材料耐久性极强; 所有颗粒均小于2 mm时 I_{d2} 的值为0%, 表示该材料耐久性极弱。由此完全崩解颗粒粒径阈值(D_{cr})确定为2 mm。计算不同 D_{cr} 所对应的耐崩解指数, 如下式:

$$I_{di} = \frac{m_{di}}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 I_{di} 为对应于 D_{cr} , 第 i 次干湿循环的崩解物耐崩解指数; m_{di} 为第 i 次干湿循环后, 崩解物粒径大于 D_{cr} 的干质量; m_0 为原试样总干质量。

耐崩解率^[17](D_R)的定义为崩解物的颗粒级配曲线面积与试样颗粒总面积的比值。图5解释了根据崩解物在干湿循环0次与30次的颗粒级配曲线计算所得的 D_R , 如干湿循环0次的 D_R 为面积 $bcihgfeb$ 连线所

围面积与面积 $abcd$ 的比值为0.1620; 干湿循环30次的 D_R 为面积 $jcmlkj$ 连线所围面积与面积 $abcd$ 的比值为0.0409。



注: 面积 $bcihgfeb$ 连线所围面积:

$$[(5-2)/2 + (2-1) \times (9.92+25.92)/2 + (1-0.5) \times (25.92+48.85/2) + (0.5-0.25) \times (48.85+69.15)/2 + (0.25-0.075) \times (69.15+85.5)/2] = 79.774$$

 面积 $abcd$ 连线所围面积: $[(5-0.075) \times 100] = 492.5$

图5 计算耐崩解率的泥岩崩解物颗粒尺寸分布曲线

Fig. 5 Computation of D_R from grain-size distribution curves of slaking mudstone

图6是根据式(1)计算中各次干湿循环过程中 D_{cr} 分别为2, 1, 0.5, 0.25, 0.075 mm所对应的耐崩解指数 I_{di} , I_{l1} , $I_{0.5i}$, $I_{0.25i}$, $I_{0.075i}$, 以及根据崩解物的颗粒级配曲线计算 D_R 。 D_{cr} 愈小, 与其对应的耐崩解指数 I_{di} 愈大。但随着干湿循环次数的增加, 无论完全崩解颗粒粒径阈值 D_{cr} 为多大, 耐崩解指数 I_{di} 及耐崩解率 D_R 均呈现减小特征。

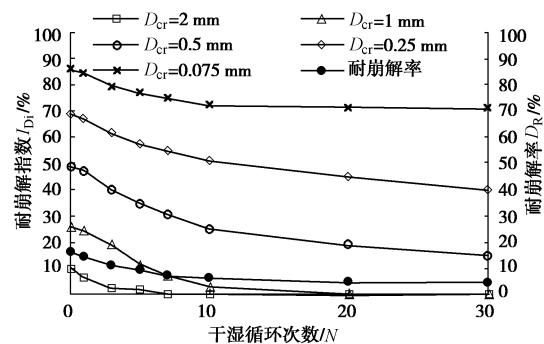


图6 对应于 D_{cr} 的耐崩解率、耐崩解指数与干湿循环次数的关系

Fig. 6 Relationship among D_R , I_{di} and N for D_{cr}

图7显示了各次干湿循环过程中耐崩解率 D_R 与裂隙率的关系。随着干湿循环次数的增加, 耐崩解率 D_R 快速减小后趋向稳定。7次干湿循环也是耐崩解率 D_R 与裂隙率的变化的拐点。当干湿循环小于7次时, 干湿循环作用对试样耐崩解率 D_R 与裂隙率是有明显影响的, 但7次后干湿循环作用不明显。这说明干湿循环作用对耐崩解率 D_R 与裂隙率的作用均存在临界

次数；小于干湿循环作用临界次数时是效果显著。

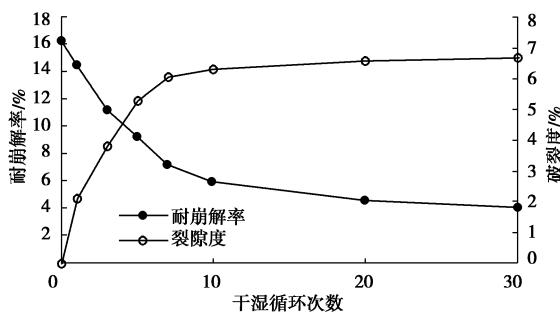
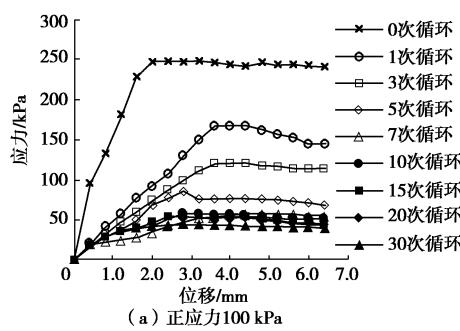


图 7 崩解率、裂隙度与干湿循环次数相关关系

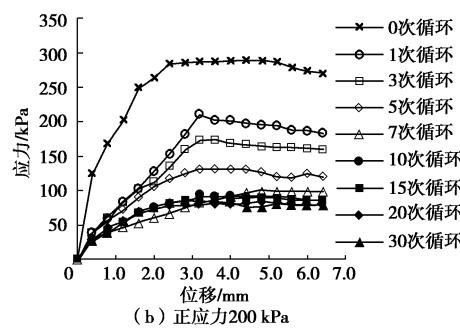
Fig. 7 Relationship between disintegration ratio and fissure ratio with number of wetting-drying cycles

3.4 泥岩崩解物的强度衰减规律

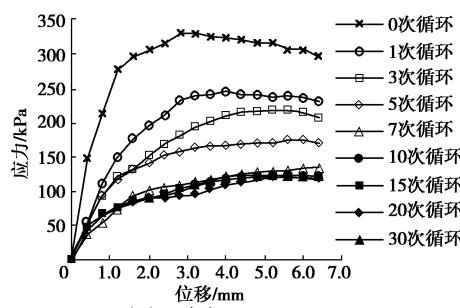
图 8 显示了剪应力 - 剪切位移曲线关系，变化特征：①峰值现象微弱，呈现一定的应变软化或者硬化现象，按照规范^[14]，最大剪应力取首次峰值；②随干湿循环次数增加，剪切曲线急剧下移，至干湿循环 7 次后下移不显著。



(a) 正应力 100 kPa



(b) 正应力 200 kPa



(c) 正应力 300 kPa

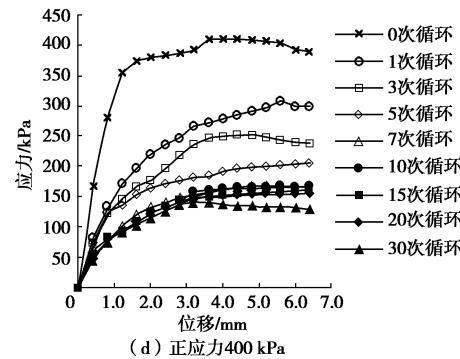


图 8 不同干湿循环次数条件下剪应力与剪切位移关系

Fig. 8 Relationship between shear stress and shear displacement with number of cycles

如图 9 展示了泥岩崩解物的最大剪应力随干湿循环次数增加而减小特征分两个阶段。第 7 次干湿循环前，最大剪应力呈现急剧减小趋势；第 7 次到第 30 次最大剪应力呈现基本平稳趋势。由此，进一步论证了第 7 次干湿循环后的泥岩崩解物强度是一个显著的转折点。

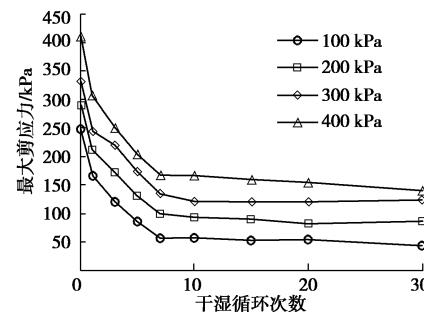


图 9 不同正应力条件下，最大剪应力与干湿循环次数的关系

Fig. 9 Relationship between maximum shear stress and wetting-drying cycle number with normal stress

3.5 耐崩解性与强度指标的相关性

如图 10 所示，随着耐崩解率 D_R 的降低，强度指标呈现衰减规律，利用指数函数拟合泥岩强度指标与耐崩解率 D_R 的关系，呈现很高的正相关性。Hajdarwish 等^[19]研究了泥岩的矿物组分、工程性质指标以及剪切

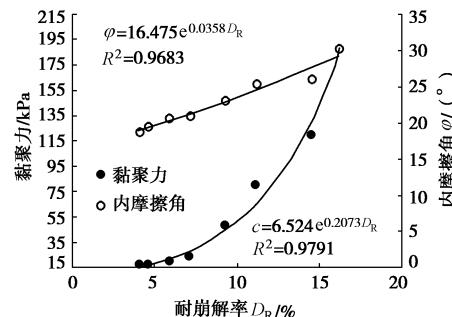


图 10 强度参数与耐崩解率关系

Fig. 10 Relationship between strength parameters and disintegration ratio of clay-bearing rocks

强度参数的关系, 认为耐崩解性指数与强度指标关系最密切, 相关系数达 0.50~0.62。本文中相关系数达 0.96 以上, 原因是本研究采用同一批岩样, 岩石矿物成分、结构与构造相同。研究表明, 泥岩崩解物的强度衰减与耐崩解率降低的关系密切, 均反映了崩解物的颗粒组成与状态。

4 讨 论

耐崩解性与强度衰减的研究, 均可涉及干湿循环, 研究成果很多。现有耐崩解试验的试样处于自由状态, 裂隙可以自由发展; 试样因胀缩变形而开裂, 颗粒破碎、散落^[7-9]; 在多次干湿循环作用后颗粒细化, 耐崩解率减小; 由于崩解过程中, 试样形状破坏, 无法进行后继强度试验。

在干湿循环过程中, 强度特性研究的试验方案有不控制试样干密度, 试样上下表面可自由膨胀与收缩, 裂隙可自由开展^[20]; 有将试样放入饱和器中, 固定体积的^[21], 裂隙开展受到一定的约束。

试样裂隙的发展变化是干湿循环对岩石崩解和岩土体强度变化的表现形式。强度衰减研究中重点关注干湿循环次数、强度衰减值、裂隙变化^[20-21], 没有分析颗粒的变化; 软岩崩解研究重点关注干湿循环次数和的颗粒变化^[7,9], 也会分析裂隙的变化^[22], 但不会分析强度的变化, 原因是试样已经破坏。

因此干湿循环的研究成果主要体现于干湿循环次数与泥岩的强度衰减值^[20-21]、耐崩解率的定量关系^[5], 对于强度与耐崩解率的定量关系仅限于初始状态^[5]。

本文综合现有干湿循环、强度、崩解的研究成果, 认为崩解是裂隙开展导致颗粒细化过程, 裂隙开展、颗粒塌落只是一次干湿循环过程中的现象; 裂隙开展、效应叠加还会导致强度衰减, 因此崩解、裂隙、强度衰减其实是试样颗粒组成与状态的不同表现形式, 存在必然的内在联系。

虽然崩解研究集中于软岩, 强度衰减研究集中于岩土体, 但两者均受干湿循环作用影响。本文在分析手段上沿用了颗粒分析以确定崩解量化指标, 展示崩解特性; 在试验过程中更多地借用岩土体干湿循环试验方法, 以能进行后继强度测试, 明确强度特性的变化。研究表明, 虽然试样由环刀固定体积, 但不能阻止裂隙的发展, 崩解的发生, 强度的衰减; 研究方法是合理的, 研究成果是可信的。

5 结 论

以引江济淮试验工程项目为依托, 以河道边坡下部低强度、弱膨胀的红层泥岩为研究对象, 提出了

有约束的崩解试验研究方法, 研究了泥岩崩解泥化与强度衰减的相关性, 结论如下:

(1) 干湿循环作用的临界次数。当干湿循环次数小于 7 次时, 泥岩裂隙度增长、崩解物颗粒组分变细、最大剪应力减小的变化程度较大, 但此后趋向稳定。

(2) 泥岩崩解物的耐崩解性变化特征。不管完全崩解颗粒粒径阈值 D_{cr} 为多大, 耐崩解指数 I_{D_i} 及耐崩解率 D_R 均呈现减小特征; 耐崩解率 D_R 更好地反映了粗颗粒的崩解状态, 且与裂隙率呈现较好地一一对应。

(3) 泥岩崩解物的强度指标、裂隙、耐崩解率 D_R 存在内存联系, 是试样颗粒组成与状态的不同特性的表现形式, 即耐崩解率是颗粒组成与状态的量化指标、强度指标是颗粒组成与状态的力学特性量化指标, 裂隙是颗粒组成与状态转化的表现形式。

参考文献:

- [1] LEE D H, YANG Y E, LIN H M. Assessing slope protection methods for weak rock slopes in Southwestern Taiwan[J]. Engineering Geology, 2007, 91: 100~116.
- [2] IRSYAM M, TAMI D, SADISUN I A. Solving landslide problem in shale cut slope in the construction of the valve chamber of the Tulis hydroelectric power[C]// Proc'99 Japan-Korean Joint Symp on Rock Engineering. Fukuoka, 1999: 217~224.
- [3] LIN M L, JENG F S, TSAI L S. Wetting weakening of tertiary sandstones microscopic mechanism[J]. Environment Geology, 2005, 48: 265~275.
- [4] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298~1302. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298~1302. (in Chinese))
- [5] 权全, 刘扬, 曹雪山, 等. 引江济淮试验工程软岩崩解特性及其影响因素试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 26~29. (QUAN Quan, LIU Yang, CAO Xue-shan, et al. Experimental research on disintegration characteristics and influence factors of the soft rock in the diversion project of water from Yangtze to Huaihe River[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2017, 34(2): 26~29. (in Chinese))
- [6] KONCAGUL E C, SANTI P M. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties[J].

- International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences, 1999, **36**: 139 – 53.
- [7] FRANKLIN J A, CHANDRA A. The slake-durability test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1972, **9**: 325 – 341.
- [8] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准规范[S]. 2013. (GB/T 50266 — 2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. 2013. (in Chinese))
- [9] International Society for Rock Mechanics (ISRM). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1976-2006[C]// ULUSAY R, HUDSON J A, eds. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods. Ankara, 2007.
- [10] KOLA E, KAYABALI K. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach[J]. Engineering Geology, 2006, **86**: 271 – 284.
- [11] MOON V G, BEATTIE A G. Textural and microstructural influence on the durability of Waikato coal measures mudrocks[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1995, **28**: 303 – 312.
- [12] 刘扬. 引江济淮试验工程软岩崩解特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2017. (LIU Yang. Experimental research on disintegration characteristics of the soft rock in the diversion project of water from Yangtze to Huaihe River[D]. Nanjing: Hohai University, 2017. (in Chinese))
- [13] 黄大庭. 半成岩地层大型滑坡的剖面特征和构造[J]. 水土保持学报, 1990, **4**(3): 43 – 50. (HUANG Da-ting. Section characters and tectonic of large-sized landslide on the stratum of semi-rock[J]. ACTA Conservationis Soli Et Aquae Sinica, 1990, **4**(3): 43 – 50. (in Chinese))
- [14] GBT50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123 — 1999 Standard for soil test method[S]. China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155 – 2161. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 – 2161. (in Chinese))
- [16] WANG L L, BORNERT M, HÉRIPRÉ E, et al. Irreversible deformation and damage in argillaceous rocks induced by wetting/drying[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, **107**: 108 – 118.
- [17] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Quantification of fragment size distribution of clay-bearing rocks after slake durability testing[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2009, **15**(2): 81 – 89.
- [18] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Soil principles[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [19] HAJDARWISH A, SHAKOOR A, NEIL A W. Investigating statistical relationships among clay mineralogy, index engineering properties, and shear strength parameters of mudrocks[J]. Engineering Geology, 2013, **159**: 45 – 58.
- [20] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 727 – 731. (LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3):727 – 731. (in Chinese))
- [21] 韦秉旭, 黄震, 高兵, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. 公路工程, 2015, **40**(8):127 – 130. (WEI Bing-xu, HUANG Zhen, GAO Bing, et al. Crack evolution rules of expansive soil and the effect on the shear strength under the action of dry-wet circulation[J]. Highway Engineering, 2015, **40**(8): 127 – 130. (in Chinese))
- [22] SADISUN I A, SHIMADA H, ICHINOSE M, et al. study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, **23**: 199 – 218.