

# 强降雨条件下易崩解泥岩边坡失稳机理研究

Study on Stability of Easily Disintegrating Mudstone Slope under Rainfall Conditions

刘付海

(北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

**摘要:** 为研究云南某工程出现的易崩解泥岩边坡在降雨条件下的稳定性问题, 室内开展了崩解特性试验、膨胀率试验、膨胀压力试验, 以及强降雨条件下易崩解泥岩的入渗试验, 主要结论如下: 易崩解泥岩试样表现出极强的崩解性, 崩解 10 次循环后残留物仅占原岩样质量的 3%; 其耐崩解指数在循环中逐渐提高但变动较小, 说明循环次数对耐崩解指数的影响不大; 易崩解泥岩试样在侧限条件下的轴向膨胀变形显著, 最终膨胀率约 11.2%, 膨胀过程可以划分为快速膨胀、减速膨胀、稳定膨胀 3 个阶段; 随着降雨强度的增大, 易崩解泥岩入渗率时程曲线的积水点与饱和点出现得越来越早, 积水点与饱和点之间的间隔越来越小; 在同一降雨强度下, 降雨入渗深度与降雨时间正相关; 同一降雨历时下, 入渗深度与降雨强度间正相关。

**关键词:** 降雨; 易崩解泥岩; 边坡; 破坏机理

**中图分类号:** TU045 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0037-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.006

LIU Fuhai

(Beijing urban construction survey, design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to study the stability of the easily disintegrating mudstone slope in a project in Yunnan under rainfall conditions, the disintegration characteristic test, the expansion rate test, the expansion pressure test, and the easy disintegration mudstone under heavy rainfall were carried out in the laboratory. The main conclusions of the infiltration test are as follows: The easily disintegrating mudstone sample shows extremely strong disintegration, and the residue after 10 cycles of disintegration only accounts for 3% of the mass of the original rock sample; its disintegration resistance index is in the It gradually increases during the cycle but changes little, indicating that the number of cycles has little effect on the disintegration resistance index; The axial expansion deformation of the easily disintegrating mudstone sample under the confinement condition is significant, and the final expansion rate is about 11.2%. The expansion process can be divided into three stages: rapid expansion, decelerated expansion, and stable expansion; With the increase of rainfall intensity, the water accumulation point and saturation point of the infiltration rate time history curve of easily disintegrating mudstone appear more and more. In the early days, the interval between the water accumulation point and the saturation point became smaller and smaller; under the same rainfall intensity, the rainfall infiltration depth was positively correlated with the rainfall time; under the same rainfall duration, the rainfall infiltration depth was positively correlated with the rainfall intensity.

**Keywords:** rainfall; easily disintegrating mudstone; slope; failure mechanism

作者简介: 刘付海 (1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程勘察。  
收稿日期: 2022-04-05

## 0 引言

我国泥岩分布范围较广, 按工程分类属于软

## 岩土力学

岩范畴,具有“似岩非岩、似土非土”的特性,即泥岩干燥时较为坚硬,遇水则崩解软化<sup>[1-4]</sup>。大量工程实践表明,泥岩边坡在降雨条件下极易出现失稳破坏,严重威胁着工程结构稳定性<sup>[5-7]</sup>。随着人类工程活动的不断发展,如公路铁路建设、矿山开采等,出现了越来越多的泥岩边坡稳定性问题<sup>[8-9]</sup>。因此,研究泥岩边坡在降雨条件下的稳定性问题一直是重点研究方向。

易崩解性是泥岩的主要特征之一,泥岩的崩解状态对泥岩边坡稳定性起着决定性作用<sup>[10]</sup>。申培武等<sup>[11]</sup>研究了干湿循环下紫红色泥岩的崩解特性,指出泥岩循环8次时的崩解剧烈,分布分形维数迅速增大,循环超过8次后泥岩崩解效应减弱,分布分形维数较为稳定。付宏渊等<sup>[12-13]</sup>则进一步探究了泥岩崩解过程对外部荷载的响应,研究指出炭质泥岩崩解的分形特征显著,且与外部荷载间呈现正相关关系。泥岩的膨胀性也是学者们的研究重点,孙怡等<sup>[14]</sup>开展了泥岩在干湿循环下的胀缩性试验,研究发现在干湿循环次数变化下,泥岩的体积膨胀率与收缩率逐渐增大,并进一步指出其膨胀稳定时间受到内部裂隙的影响。LIU等<sup>[15]</sup>为揭示软岩的崩解机理,通过XRD分析了软岩的矿物类型与含量,研究表明软岩的亲水矿物含量与其崩解性呈正比,干湿循环下亲水矿物的胀缩变化导致泥岩内部孔隙增长,致使泥岩软化崩解。

目前学界对泥岩边坡的稳定性及破坏机理的研究成果丰硕,但不同地区的泥岩种类、成分差异较大,针对易崩解泥岩的研究不多。为研究云南某工程出现的易崩解泥岩边坡稳定性问题,对现场取回的岩样开展了崩解特性试验、膨胀率试验、膨胀压力试验,以及强降雨条件下易崩解泥岩的入渗试验,研究成果可为预测降雨诱发易崩解泥岩边坡失稳问题提供一定参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

试验用易崩解泥岩取自云南省楚雄市,呈黄褐色,矿物颗粒较小,其矿物组成见表1,主要有

蒙脱石、伊利石、石英等,其基本物理力学指标见表2。

表1 易崩解泥岩矿物组成

石英	蒙脱石	伊利石	钾长石	斜长石
47.3	32.7	10.6	6.3	3.1

### 1.2 循环崩解试验

实践表明,降雨引起的干湿循环会加速泥岩的崩解,进而导致边坡失稳<sup>[8-11]</sup>。因此,设计对取回岩样开展崩解性测试,仪器选用SCL-1岩石耐崩解性试验仪。试验步骤如下:(1)选取均匀球状岩样,置于烘箱内烘干,冷却至室温后称量;(2)将烘干岩样装进筛筒,并置于试验仪中,注水后开始试验;(3)试验结束后,分别取出筛筒中的残留岩样、水槽中的沉淀岩样进行烘干称重,完成一次干湿循环;(4)将烘干的残留岩样装进筛桶,重复前述步骤(2)~(3),共进行10次循环。

### 1.3 膨胀特性试验

泥岩的崩解只是水-岩作用对泥岩结构破坏的表现形式,为进一步研究水-岩如何作用于泥岩导致其结构破坏,对泥岩在水-岩作用下的力学特性以及变形特性开展研究。为降低因泥岩的软化、崩解等特性对膨胀性测试带来的误差,考虑给试样加铸铁套管以约束其径向变形,泥岩试样尺寸为 $\varphi 50 \text{ mm} \times H 50 \text{ mm}$ ;将试样置于试验仪中开始膨胀性测试,试验开始后2 h内每15 min记录试验数据,2 h后每1 h记录试验数据,由此获得试样的膨胀率与膨胀压力。试验仪器选用了膨胀试验仪与膨胀压力试验仪。

### 1.4 入渗特性试验

为研究不同降雨强度下易崩解泥岩的入渗特性,降雨强度设计了5、15、25、35、45 mm/h共5种,最长降雨历时105 min,在室内开展了强降雨条件下易崩解泥岩的入渗试验,试验装置如图1所示。首先将泥岩试样装入长 $\times$ 宽 $\times$ 高=100 cm $\times$ 25 cm $\times$ 25 cm的木制方柱内,每个降雨强度设7个方柱,将其固定在模型试验台上进行模拟降雨试验,降雨试验开始后每隔5 min量测损失雨量与积水雨量,试验过程中观察方柱表层积水情况并记

录积水出现对应的时刻，用以分析泥方柱入渗率；降雨试验开始后每隔 15 min 取出一个方柱，确定入渗分界点与入渗深度，用以分析降雨条件下泥岩入渗深度规律。

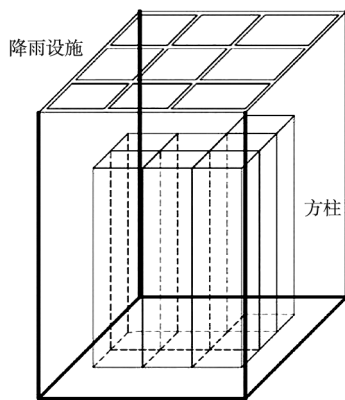


图 1 模拟实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation experiment

## 2 试验成果分析

### 2.1 易崩解泥岩崩解特性

循环崩解试验中易崩解泥岩的残留物形态如图 2 所示，试验成果如图 3 所示，其中耐崩解系数为标准循环后残余物质的烘干质量与上一次残余物烘干质量的比值。

从图中可以得知，试样表现出极强的崩解性，从图 2 肉眼可以观察到，崩解残留物随着循环次数的增加而显著减少；从图 3 可以看到经过 10 次循环后，易崩解泥岩的残留物由 520.76 g 降至 14.3 g，仅占原岩样质量的 3%；其耐崩解指数在循环中逐渐提高并趋于稳定，但不同循环次数下易崩解泥岩的耐崩解指数均在 80%~90% 范围内，说明循环次数对耐崩解指数的影响不大。分析原因为泥岩的崩解性是一种固有属性，不受干湿循环次数的影响，干湿循环次数只能加速其崩解。泥岩崩解的主要原因是水-岩相互作用，一方面泥岩内部黏土矿物具有较强亲水性与一定的膨胀性，与水接触后反应产生膨胀应力；另一方面泥岩内部孔隙吸水后产生楔裂压力，二者共同作用导致泥岩崩解破坏。



图 2 易崩解泥岩崩解残留物形态变化图

Fig. 2 Morphological changes of disintegrating mudstone disintegration residues

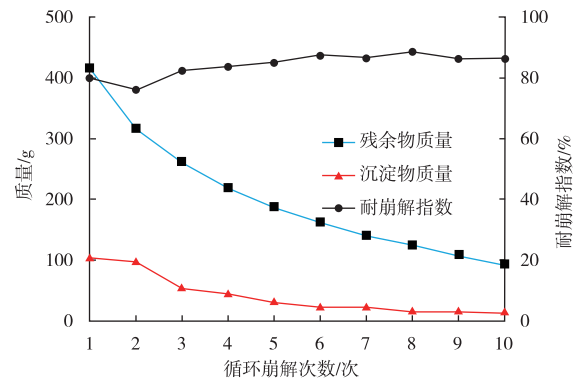


图 3 易崩解泥岩崩解试验成果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disintegration test results of easily disintegrating mudstone

### 2.2 易崩解泥岩膨胀特性

膨胀性测试获得易崩解泥岩的膨胀率时程曲线及膨胀压力时程曲线如图 4 所示，从图 4 可以看出，侧限条件下，易崩解泥岩膨胀过程经历快速膨胀、减速膨胀、稳定膨胀 3 个阶段：快速膨胀阶段从浸水开始持续到 120 min，膨胀率约 7.0%，快速膨胀阶段的轴向膨胀量占最终膨胀量的 62% 左右；减速膨胀阶段从 120 min 持续到 720 min，膨胀率约 10.6%，减速膨胀阶段的轴向膨胀量占最终膨胀量的 32% 左右；稳定膨胀阶段在浸水 720 min 以后，试验进行到 1440 min 终止，最终膨胀率约 11.2%，稳定膨胀 720 min 后的轴向膨胀量

### 岩土力学

仅占最终膨胀量的 6%左右。

从图 4 中易崩解泥岩的膨胀压力时程曲线来看，易崩解泥岩的膨胀压力时程曲线与膨胀率时程曲线的发展规律相似，也经历了快速膨胀、减速膨胀、稳定膨胀 3 个阶段：膨胀压力在快速膨胀阶段呈直线增长趋势，在减速膨胀阶段出现波动现象，在稳定膨胀阶段趋于稳定。

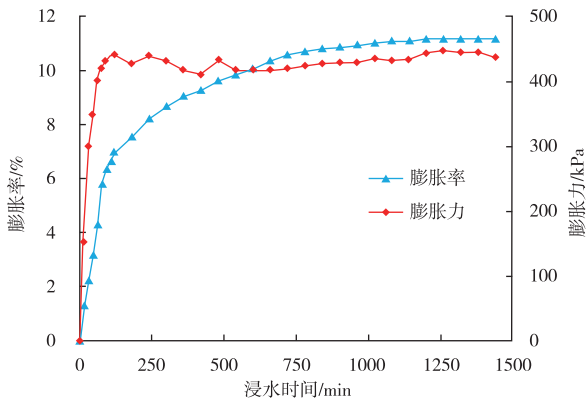


图 4 易崩解泥岩的膨胀时程曲线

Fig. 4 Swelling time history curve of easily disintegrating mudstone

### 2.3 易崩解泥岩的降雨入渗特性

根据入渗试验成果，易崩解泥岩在不同降雨下的入渗率时程曲线如图 5 所示，其中泥岩入渗能力根据其饱和渗透系数  $4.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  换算所得。从图中可以观察到，当降雨强度低于易崩解泥岩的入渗能力时，方柱表面未出现积水现象，易崩解泥岩的入渗率时程曲线始终与降雨强度保持一致；当降雨强度超过易崩解泥岩的入渗能力时，降雨初期雨水全部渗入泥岩，方柱表面无积水，易崩解泥岩的入渗率与降雨强度保持一致；降雨中期方柱表面开始出现积水，此时入渗率开始直线下降，将这一转折点称为积水点，说明泥岩内部含水率逐渐提高，导致降雨积水，最终入渗率降至泥岩入渗能力，说明此时泥岩饱和，这一转折点为饱和点；降雨末期泥岩入渗率与泥岩入渗能力重合。对比不同降雨强度下的入渗率曲线可以发现，随着降雨强度的增大，易崩解泥岩入渗率时程曲线的积水点与饱和点出现得越来越早，降雨强度 0.25 mm/min、0.42 mm/min、0.58 mm/min、0.75 mm/min 下易崩解泥岩入渗率时程曲线出现积水点的时间分别为 95 min、

40 min、35 min、30 min，出现饱和点的时间分别为 95 min、90 min、80 min、65 min；易崩解泥岩入渗率时程曲线上积水点与饱和点之间的间隔越小，降雨强度 0.25 mm/min、0.42 mm/min、0.58 mm/min、0.75mm/min 下易崩解泥岩方柱积水点与饱和点的时间间隔分别为 0、50 min、45 min、35 min。

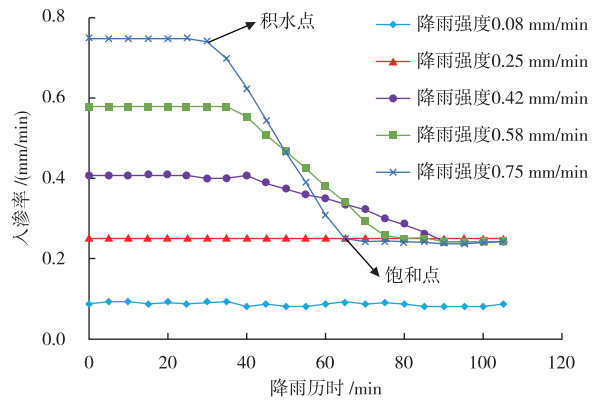


图 5 易崩解泥岩不同降雨强度下的入渗率时程曲线

Fig. 5 Time history curves of infiltration rate of easily disintegrating mudstone under different rainfall intensities

降雨入渗深度对泥岩边坡稳定性起着至关重要的影响作用。根据入渗试验成果，绘制不同降雨强度下泥岩的入渗深度时程曲线如图 6 所示。从图 6 可知，在同一降雨强度下，降雨入渗深度随着降雨时间的增长而逐渐向易崩解泥岩方柱深部延伸，二者呈现出正相关关系；对比不同降雨强度下的入渗深度时程曲线可以得出，同一降雨历时下，入渗深度与降雨强度间呈现为正相关关系。

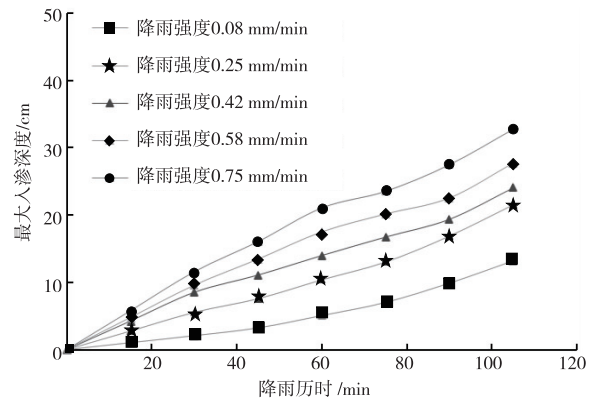


图 6 不同降雨强度下泥岩入渗深度时程曲线

Fig. 6 Time history curve of mudstone infiltration depth under different rainfall intensities

### 3 结论

(1) 易崩解泥岩试样崩解性显著,崩解残留物在循环 10 次后仅占原岩样质量的 3%;易崩解泥岩的耐崩解指数随着循环次数的增加而逐渐提高但变动较小,不同循环次数下易崩解泥岩的耐崩解指数均在 80%~90% 范围内,说明耐崩解指数受循环次数对的影响较小。

(2) 侧限条件下易崩解泥岩试样的轴向膨胀变形显著,最终膨胀率约 11.2%,其膨胀过程可以划分为 3 个阶段:快速膨胀阶段的轴向膨胀量占最终膨胀量的 62% 左右,膨胀压力呈直线增长趋势;减速膨胀阶段的轴向膨胀量占最终膨胀量的 32% 左右,膨胀压力出现波动;稳定膨胀阶段的轴向膨胀量仅占最终膨胀量的 6% 左右,膨胀压力趋于稳定。

(3) 当降雨强度超过易崩解泥岩的入渗能力时,降雨初期入渗率与降雨强度保持一致;降雨中期入渗率直线下降,直至易崩解泥岩入渗能力;降雨末期入渗率曲线与入渗能力保持一致;随着降雨强度的增大,易崩解泥岩入渗率时程曲线的积水点与饱和点出现得越来越早,积水点与饱和点之间的间隔越来越小。

### 参 考 文 献

- [1] 张黎明,阳个小,张涛,等.干湿循环下炭质泥岩力学特性演化规律试验研究[J].公路,2021,66(10):340-345.
- [2] 陈纪昌.库区红层泥岩水化特性及干湿循环作用下的渐进损伤研究[J].中国农村水利水电,2021(3):143-147+152.
- [3] 李桂臣,孙长伦,何锦涛,等.软弱泥岩遇水强度弱化特性宏观模拟研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(5):935-942.
- [4] 孙长伦.泥岩细观力学特性及其遇水弱化规律研究[D].中国矿业大学,2019.
- [5] 陈纪昌.干湿循环及地震耦合作用下的库区红层泥岩边坡稳定性分析[J].水电能源科学,2021,39(4):133-136+203.
- [6] 梁鹏.降雨对泥岩边坡稳定性影响机制分析[J].四川建筑,2015,35(6):124-125.
- [7] 黄海龙,赵新涛.考虑降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性研究[J].工程勘察,2008(6):36-39+46.
- [8] 安明旭,吴森,蔺港,等.泥岩边坡的病害特征及破坏模式研究[J].交通科技,2015(1):64-67.
- [9] 曾铃,付宏渊,贺炜,等.降雨入渗因素对炭质泥岩路堤边坡稳定性的影响[J].公路交通科技,2013,30(3):39-44+58.
- [10] 付宏渊,曹硕鹏,张华麟,等.湿-热-力作用下软岩边坡破坏机理及其稳定性研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2081-2098.
- [11] 申培武,唐辉明,汪丁建,等.巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J].岩土力学,2017,38(7):1990-1998.
- [12] 付宏渊,刘杰,曾铃,等.考虑荷载及干湿循环作用的炭质泥岩崩解特征试验[J].中国公路学报,2019,32(9):22-31.
- [13] 付宏渊,刘杰,曾铃,等.考虑荷载与浸水条件的预崩解炭质泥岩变形与强度试验[J].岩土力学,2019,40(4):1273-1280.
- [14] 孙怡,邓荣贵,文琪鑫,等.红层泥质岩循环干湿风化下变形特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):57-65.
- [15] LIU X X, WU Z J, WANG G, et al. Research on the softening and disintegration mechanism of carbonaceous shale [J]. Advanced Materials Research, 2013, 671/672/673/674: (274-279)