

泥岩岩质边坡破坏过程的模型试验研究

陈小明¹, 黎明¹, 商会州¹, 魏厚振²

(1. 湖北省交通规划设计院, 武汉 430051; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要:为揭示泥岩岩质边坡在环境荷载以及由于边坡倾角改变引起的失稳过程,采用二维边坡模型,对不同坡脚、结构面填充条件下的岩质边坡破坏过程进行了详细的试验研究。通过模拟人工降雨条件下的岩质边坡破坏揭示了干湿循环的渐进性物理风化过程;对有无干湿循环、填充物以及不同结构面倾向的泥岩岩质边坡的破坏进行对比研究,揭示泥岩边坡破坏的影响因素。利用工业相机采用非接触手段采集边坡破坏的发生、发展过程,对破坏形态进行归纳总结。结果表明:泥岩岩质边坡破坏与边坡倾角、坡脚、结构面填充物及外部环境有密切关系;反倾边坡破坏易从坡顶关键体破坏并迅速扩展,从而导致整体垮塌;泥岩岩质边坡坡面处应力集中最严重,破坏从坡面开始并迅速往坡内发展,导致边坡的整体失稳。最后结合实验结果,给出了具体的工程建议。

关键词:泥岩岩质边坡;边坡破坏过程;紫红色泥岩

中图分类号:TU 443 文献标识码:A

Research on the Model Experiment of Failure Process of Mudstone Rock Slope

CHEN Xiao-ming¹, LI Ming¹, SHANG Hui-zhou¹, WEI Hou-zhen²

(1. Hubei Communication Planning and Design Institute, Wuhan 430051, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to reveal failure progress caused by environmental loads as well as change of obliquity of slopes in mudstones, two-dimensional mudstone model of slopes are carried out, under the condition of different feet, fill discontinuities of rock slope to investigate the failure process through experiments, rock slope by artificial rainfall damage under simulated conditions to reveal the gradual physical weathering processes of wet and dry cycles, on whether the wet-dry cycle, fillers and different structures are destroyed. A comparative study reveals mudstone slope failure factors by using industrial cameras with the method of non-contact means of acquisition. To observe process of slope failure, the failure modes are summarized. Results indicate that mudstone rock slope destruction is closely related to slope inclination, toe, the filler surface structure and external environment. Anti-dumping is easily damaged from the top of the hill slope failure shut fitness and rapid expansion, thus resulting in an overall collapse; stress concentration of mudstone rock slope is most serious in surface, damage of the slope began from the top of the slope and quickly leads to overall lost stability. Finally, based on experimental results, specific project proposals are given.

Key words: rock slope; failure progress; purplish-red mudstone

随着西部交通等基础设施建设的大力发展,在不良地质条件和特殊地区开挖边坡修筑路基的案例越来越多。在巴东县境内大面积分布着巴东组紫红色泥岩,该套岩层地区往往形成缓边坡,由于紫红色泥岩物理风化等使得岩体力学性质的恶化从而导致出现诸如滑坡、地基错列等病害的发生,泥岩的吸

水崩解性极大损坏了地基强度,甚至会导致建筑及边坡破坏^[1]。泥岩在气温和降雨等外界环境荷载作用下会发生快速风化^[2],使得本来是岩质的边坡转化为介于岩质和土质之间的过渡型边坡,这比单纯的岩质边坡和土质边坡都要复杂。

针对边坡失稳破坏问题的研究手段包括理论研究、数值模拟、模型试验和现场监测等^[3]。但是鉴于渐进性破坏问题的复杂性,加之场地和经费等因素,现有手段还需借助室内模型试验^[4]。特别是三峡库区人工开挖的高切坡由于地质条件复杂,岩体破碎,易于风化等因素使得已建工程暴露出了越来越多的

收稿日期:2014-10-20

作者简介:陈小明(1963-),女,高级工程师,主要从事岩土工程勘察设计及研究工作。E-mail:weihouzhen@163.com。

问题。已有的研究成果多采用百分表等接触式测量方式,解释了岩质边坡由于开挖、外界荷载等因素造成的失稳过程及机理^[5-7]。文献[8-10]将非接触测量模式引入了边坡稳定性的土质边坡模型试验中,用于采集边坡破坏的发生、发展过程,有助于为边坡治理提供科学依据。文献[11]探讨了水位升降和波浪作用下水下岩质边坡的稳定性和破坏机制,发现破坏始于坡脚。

综上所述,学者们通过模型试验取得大量卓有成效的结论,但是对于近水平岩质边坡由于外界环境荷载变化而造成快速破坏的研究尚不多见。本文采用非接触方式观测岩质边坡破坏过程,通过改变环境荷载以及边坡倾角等因素,观测边坡失稳的发生、发展过程,以便掌握泥岩边坡的破坏机制,从而为红层地区边坡的生态治理提供必要的参考。

1 试验装置及过程

1.1 试验装置

模型试验在环境箱内恒温条件下进行,试验模型如图1所示,包括环境箱、降雨模拟系统、模型支架、成像系统4部分组成。具体如下:

(1)环境箱。试验环境采用DSW01020程式恒温恒湿试验箱进行控制,其工作空间长宽高均为1 m,工作高度可用侧边支架调节,温度控制范围 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度控制范围 $25\%\sim 98\%\text{ R. H.}$,用于模拟外界环境条件的变化。

(2)降雨模拟系统。降雨由内径12 mm硅胶管从供水口引水后经过LZB-4玻璃转子流量计调节流量再分流到2根内径4 mm的塑料管,塑料管每间隔50 mm分布一个直径1.5 mm的小孔,通过降雨面积和所通过的流量来计算降雨强度,在模型支架的下方放置一长宽高分别为 $95\text{ cm}\times 70\text{ cm}\times 13\text{ cm}$ 的不锈钢接水槽,收集降雨后的水流。

(3)模型支架。堆放试样的支架采用角钢焊接,长宽高尺寸分别为 $80\text{ cm}\times 60\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,底板支撑采用钢板钻孔做成的可调斜面,钢板倾角由2个可调螺丝控制,钢板长宽为 $66.2\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,支架整体放置在环境箱内。

(4)成像系统。主要由Allied GE1910非插值视觉相机、LED灯源、相机及灯源支架、相机保护外壳和Prostream视频采集及处理系统组成,实时记录由于反复干湿循环引起的边坡破坏。

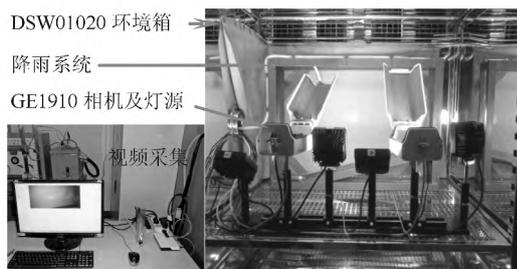


图1 试验与成像系统

Fig. 1 Festing and imaging systems

1.2 模型制作和试验过程

本次试验设计1个在恒温多次降雨条件下边坡渐进性破

坏模型以及4个由千斤顶抬升倾角而导致的破坏模型,具体情况见表1。模型由碾压之后颗粒粒径小于2 mm的紫红色泥岩粉末配质量百分数5%的PO32.5水泥养护1周后堆积而成,堆积模型的试块尺寸为 $3\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。

表1 试验模型一览表 (°)

Tab. 1 Test models of layered rock slope

组号	倾角	破坏倾角	坡脚	说明
1	10	—	30	层间充填,不改变倾角,4次干湿循环
2	15	23	30	层间充填,4次干湿循环,顺层边坡,通过改变倾角至破坏
3	15	23	30	层间无充填,顺层边坡,通过改变倾角至破坏
4	75	28	30	层间无充填,反倾边坡,通过改变倾角至破坏
5	15	18	30	层间充填,顺层边坡,通过改变倾角至破坏

1号边坡在DSW01020恒温恒湿试验箱内控制 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温每隔21 h降雨3 h,控制降雨强度为 1.1 mm/min ,反复循环4次。边坡所经历湿度如图2所示,在降雨的时候环境湿度逐渐从33%左右增加至约55%,随后在干燥时,湿度又缓缓减小至33%左右。2号边坡是经过4次干湿循环之后的岩块在倾角 15° ,坡脚 30° 的情况下通过改变倾角引发边坡失稳的情况。3~5号边坡均为养护之后岩块改变倾角引发破坏的案例。其中1号、2号和5号边坡层间均匀铺洒粒径为0.5 mm的泥岩粉末。

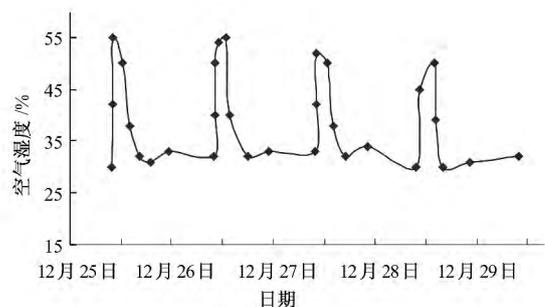


图2 干湿循环导致的空气湿度变化

Fig. 2 Air humidity changes caused by wet and dry cycles

1.3 试验过程

将紫红色泥岩用橡皮锤碎后过2 mm筛,粒径小于2 mm的试样掺5%的PO32.5水泥混合,采用不锈钢模具控制试样的干密度为 2.2 g/cm^3 ,块体尺寸为 $3\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,在保湿缸内养护7 d后用石膏对试块进行标记,并堆置成倾角与坡脚分别为 15° 和 35° 的二维边坡模型如图3所示,试样间用粒径小于1 mm的红砂岩充填。保持环境箱内温度恒定为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔21 h降雨3 h,保持降雨强度为 1.1 mm/min ,总共进行了11次干湿循环,试验过程中拍摄斜坡表面的形态变化。

2 试验结果及分析

2.1 环境荷载变化引起的破坏

环境荷载主要体现在干湿循环、温度对边坡的稳定性影



图3 二维岩质边坡模型

Fig. 3 Model of two dimensional rock slope

响。通过玻璃转子流量计控制所需的流速,观测由于降雨引起的边坡渐进性破坏过程。由于岩块层间有细颗粒泥岩填充,造成水流沿着结构面存在优势流场的现象。由于降雨造成的化学-物理作用对边坡表层的影响尤为明显,如图4所示,表层岩块在4次干湿循环之后已经发生明显的破坏。并且,由于岩块中黏土矿物的存在造成了斜坡一定的蠕变,蠕变造成了岩质边坡的松动,导致边坡水力路径的改变,优化了降水入渗的通道,同时促进黏土矿物在结构面的积累和形成,对结构面起到润滑作用,影响斜坡的稳定性。

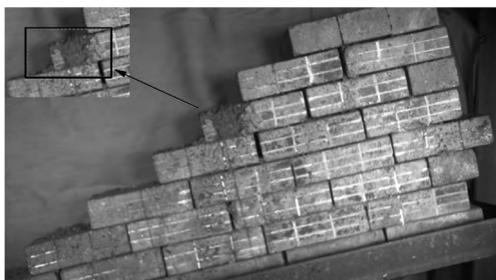


图4 4次降雨循环引起的边坡破坏

Fig. 4 Slope failure caused by four times rainfall

2.2 化学作用

化学作用主要体现在降雨对结构面亲水矿物以及胶结物的影响。文献研究表明,巴东组紫红色泥岩中的黏土矿物在基岩中为42%左右,而在风化岩中却显著增加达53%。含结构面岩体中细颗粒泥岩填充了发育的结构面,形成了良好的雨水通道,在雨强1.1 mm/min的降雨条件下,致使雨水沿着结构面渗透,如图5所示,当颗粒细小的黏土矿物与水接触后,由于其强亲水性引起黏土矿物吸附水膜增厚,试块体积膨胀,体胀的不均匀使得试块内产生了不均匀应力,部分胶结物被稀释、软化或溶解,于是导致试块裂缝的产生。

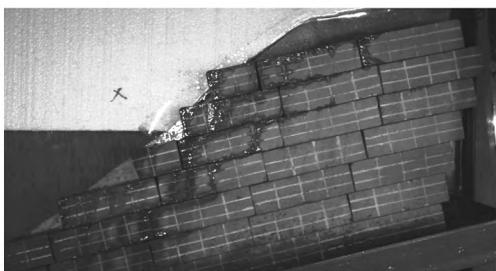


图5 第1次降雨过程

Fig. 5 The first rainfall period

紧接着在30℃的恒温干燥情况下,由于环境湿度的降低,胀缩的各项异性造成失水后原有微裂纹的发展扩散和新裂纹的产生,形成纵横交错的裂隙,表现为如图6所示在第2次干燥过程中就产生了明显的裂纹。同时,试块间的夹层以细粒组为主,黏粒含量较高,在降雨过程中,夹层强度随着夹层土样中含水率的增加而降低进而导致泥化,引起了坡体的部分溜滑。由图5~图7对比可以看出,部分试块沿着结构面的位移较大但并未发生明显的整体滑坡。随着降雨次数的增加,边坡紫红色的色泽也随之发现明显变化,逐渐由紫红色变暗,与试块内矿物的氧化还原反应有密切的关系。

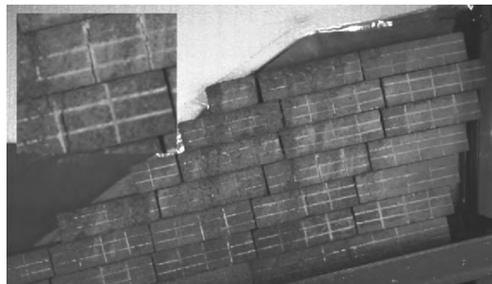


图6 第2次干燥过程

Fig. 6 The second drying period

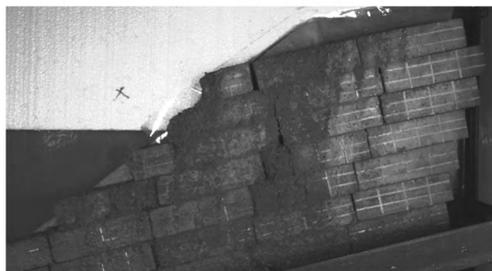


图7 第5次干燥过程

Fig. 7 The fifth drying period

2.3 物理力学作用

物理力学作用主要指在降雨以及干湿循环过程中的胀缩对边坡的侵蚀作用。随着干湿循环次数的增加,部分试块胀缩后土颗粒剥离了原先的试块,在降雨形成的坡面流和渗透作用下流失,初期主要以片蚀为主,包括雨滴的溅蚀和坡面薄层水流的面蚀作用,如图8所示,即为片蚀的结果。随着被侵蚀部分土颗粒的流失,坡面距离降雨系统高度随之增加,水流的掏蚀能力逐渐增大,进而发展形成具有一定深度和宽度的浅沟蚀和切沟蚀,如图9所示,边坡部分块体由于重力作用发生了局部的坍塌,与试验前边坡体对比,已经出现了明显的破坏。

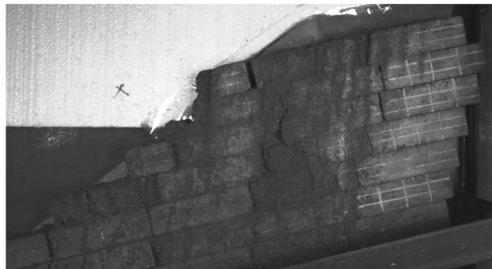


图8 第7次干燥过程

Fig. 8 The seventh drying period

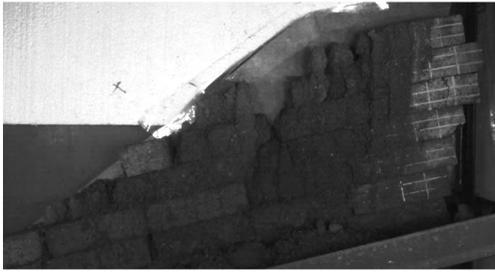


图9 第11次干燥过程

Fig. 9 The eleventh drying period

在地质边坡中,暴雨或持续降雨条件下,由于大量雨水的入渗,地下水沿着不透水的泥岩汇集从而产生渗透水压力作用于边坡,使边坡下滑力增加,增大滑动的可能性。

2.4 改变倾角引起失稳过程

按照表1的规定堆放边坡之后,随着坡度的逐渐增加,2号、3号、4号、5号边坡发生失稳时的斜坡槽倾角分别为 23° 、 23° 、 28° 、 18° 。发现虽然4种边坡初始坡脚跟倾角一致,但是由于堆积方式、结构面填充情况以及边坡岩体所处环境的差别,造成了其破坏时的倾角不一致。4种边坡最先发生破坏的是层间有干燥填充物的顺层边坡,最难发生破坏的是由于坡顶岩块有内锁作用的反倾边坡。5号与3号边坡相比,由于5号边坡层间填充了粒径小于 0.5 mm 的细颗粒粉末,对岩块起到了一种助滑作用,故5号边坡发生初始破坏的角度远比3号边坡小。图10给出了2~5号4种不同类型边坡的破坏形态照片,无论是顺层边坡还是反倾边坡,由于倾角改变,破坏均是突然发生的。对于顺层边坡,坡顶先出现明显的裂缝,随之边坡其他部位迅速发生垮塌。

以3号边坡为例说明岩块在边坡坡脚抬升过程中沿着边坡槽滑动位移的变化情况,在边坡上布置位移监测点如图11所示,1、2、3点均为边坡坡面上的点。监测点随着边坡倾角变化的位移如图12所示,显示在边坡倾角从 15° 一直抬升到 23° 时岩块均未发生明显的位移,而当达到 23° 之后,岩块1出现了一定量的滑动,随后在 24° 时岩块2与3也发生了突然的滑动,说明由于倾角改变以及类似的外界触发因素下,岩质边坡的破坏是在很短的时间内完成的,这就给岩质边坡的预测预报增加了难度。

3 结 语

通过室内泥岩岩质边坡模型试验,对易风化泥岩边坡由于环境、倾角改变引发的破坏得到了一些有益的结论,但也存在一定的不足。

(1)坡脚、结构面及外界环境是导致岩质边坡破坏的关键因素,岩质边坡的破坏较土质边坡具有突发性。

(2)反倾边坡破坏从坡顶的关键块体并迅速扩展到边坡的其他部位,引发边坡的整体垮塌,泥岩表层在降雨、温度等环境荷载下容易发生崩解,关键块体易发生破坏,故反倾边坡更易发生滑坡。

(3)由于实验条件有限,模型尺寸较小,故边界效应不容忽视,且未能监测到内部应力场、位移场。

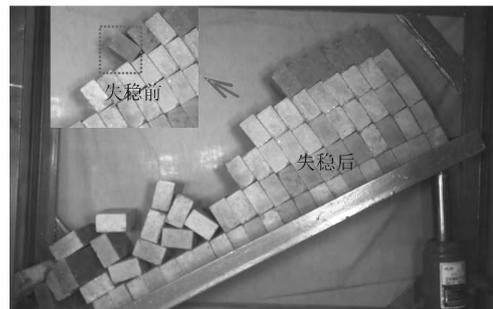
(4)干湿循环易使富含亲水性强的黏土矿物的泥岩结构面



(a) 2号有填充顺层边坡(4次干湿循环之后)



(b) 3号无填充顺层边坡



(c) 4号无填充顺层边坡



(d) 5号无填充顺层边坡

图10 倾角改变导致的边坡破坏

Fig. 10 Slope failure caused by angle change

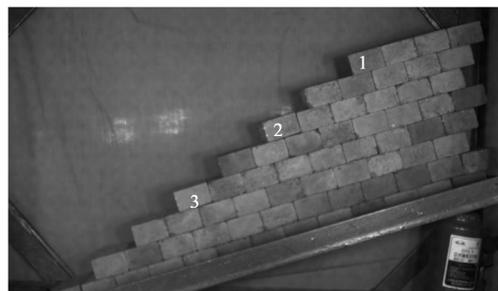


图11 3号边坡初始状态及检测点布置

Fig. 11 Initial state of 3# slope and observation point

(下转第165页)

聚集地的人行桥除有人流外,使用过程中难免有牲畜或畜力车等通过,人群荷载除依照《公路 04 规范》外,还可参考《城市 11 规范》和《人行 95 规范》校核;城镇工业区可能经常有非机动车辆通行,应同时满足公路和城市规范的规定;农田灌区上人行桥使用《灌溉 11 规范》的人群荷载较为合适,因为《灌溉 11 规范》的相关规定是基于《公路 04 规范》强制性标准。

1.6 注意作用组合的不同规定

除此之外,还应当注意结构设计须根据不同设计状况下在结构上可能同时出现的作用,按承载能力极限状态和正常使用界限状态 2 种分别进行作用组合,并应取各自的最不利的组合进行设计。虽然《工程结构可靠性设计统一标准》(GB50153-2008)统一归纳了房屋建筑、铁路、公路、港口和水利水电等各种工程结构设计的基本原则、要求和方法,但是建筑工程、公路工程及水利水电工程结构设计又有各自的特点,在作用组合表达式中的系数设置和大小的规定均有不同。因此,人行桥工程所采用的人群荷载还须考虑引用规范中活荷载标准值及其组合值、频遇值的准永久值的系数的不同规定的影响。

比如虽然《城市 11 规范》中划分了桥梁结构的设计年限,但是在《公路 04 规范》、《城市 11 规范》和《人行 95 规范》、《灌溉 11 规范》的基本组合表达式中,都没有像现行国家标准《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)中规定的可变荷载考虑设计使用年限的调整系数。另外,根据结构的重要性、结构破坏可能产生后果的严重性而划分的工程的设计安全等级直接影响基本组合的结构重要性系数的取值,然而,《城市 11 规范》对于大桥、中桥和小桥设计安全等级就高于《公路 04 规范》的相关

规定,因而结构重要性系数须取较大值。

2 结 语

人行桥内力计算虽然只需要以面荷载的形式考虑人群均布荷载,而不用像通车梁桥那样,同时考虑情况复杂的汽车荷载及冲击系数,但是人行桥也有其规模属性的设计思路和方法,设计过程仍不应马虎大意。因此,在进行桥梁设计时不能随意套用甚至直接挪用,应进行相关的分析比较和校核计算。

以上规范的对比分析表明,不论《城市 11 规范》、《人行 95 规范》还是《灌溉 11 规范》,人行桥梁荷载标准的架构与《公路 04 规范》的强制性条款相呼应,与之有一定的承接关系,但是并没有简单地沿用《公路 04 规范》的规定,而是着重针对各自行业内涉及人行桥梁的荷载标准进行调整或细化,具有一定的城市桥梁和农桥的特征性。在设计中应结合实际情况和涉及到的相关规范,具体问题具体分析。 □

参考文献:

[1] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范[S].
 [2] CJJ 69-1995,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
 [3] CJJ 11-2011,城市桥梁设计规范[S].
 [4] SL 482-2011,灌溉与排水渠系建筑物设计规范[S].
 [5] GB 50068-2001,建筑结构可靠度设计统一标准[S].
 [7] GB 50153-2008,工程结构可靠性设计统一标准[S].
 [6] GB 50009-2012,建筑结构荷载规范[S].
 [8] GB/T 50283-1999,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].

(上接第 162 页)

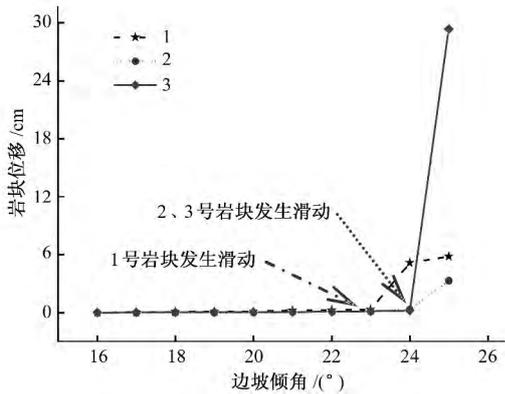


图 12 3 号边坡倾角~监测岩块位移
 Fig. 12 Angle vs displacement of No. 3 slope

软化、膨胀,引起微裂纹扩展并发展,最终导致边坡崩塌。

本次试验时,边坡的排水条件良好,但是在实际情况中,边坡较大,排水路径不是特别通畅的条件下,边坡中存在水压力附加的下滑力,强降雨过程中岩块沿着结构面下滑。针对紫红色泥岩地区这些存在的问题,工程实践中应特别注意:对可能发生滑坡的坡体设置截水沟、排水沟和急流槽,及时排除地表降雨来水,防治雨水冲刷和入渗边坡,同时结合挡土墙、植被护坡等综合考虑边坡的治理,如果边坡所处环境荷载比较恶劣,必要时需进行喷射混凝土、喷锚等支护防治。 □

参考文献:

[1] 吴益平,余宏明,胡艳新. 巴东新城紫红色泥岩工程地质性质研究[J]. 岩土力学, 2006,27(7):1 201-1 208.
 [2] 杨宗才,张俊云,周德培. 红层泥岩边坡快速风化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(2):275-283.
 [3] 贾官伟,詹良通,陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(9):1 789-1 803.
 [4] 徐前卫,朱合华,丁文其,等. 软弱破碎直立岩质边坡渐进性破坏及其锚固效应的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4):139-147.
 [5] 唐红梅,陈洪凯,曹卫文. 顺层岩体边坡开挖过程模型试验[J]. 岩土力学, 2011,32(2):435-440.
 [6] 陈从新,黄平路,卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007,28(3):476-481.
 [7] 胡修文,唐辉明,刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(12):2 089-2 095.
 [8] 张 嘎,王爱霞,牟太平. 边坡破坏过程离心模型试验的应力位移场研究[J]. 岩土力学, 2008,29(10):2 637-2 641.
 [9] 李明,张 嘎,胡 耘,等. 边坡开挖破坏过程的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010,31(2):366-370.
 [10] 卢坤林,朱大勇,杨 扬. 边坡失稳过程模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012,33(3):778-782.
 [11] 姜海西,沈明荣,程 石,等. 水下岩质边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009,30(7):1 993-1 999.