

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202401122024101963

文章编号:1674-599X(2024)04-0093-09

引用格式:谢腾,黎正龙,李盛南,等.降雨作用下含炭质泥岩夹层边坡的变形破坏机理[J].交通科学与工程,2024,40(4):93-101.

Citation: XIE Teng, LI Zhenglong, LI Shengnan, et al. The mechanism of deformation and failure of carbonaceous mudstone interlayered slopes under rainfall[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 93-101.

降雨作用下含炭质泥岩夹层边坡的变形破坏机理

谢腾¹,黎正龙²,李盛南^{2,3},刘新喜²,莫晓庆²

(1.株洲城发城市更新投资建设运营有限公司,湖南 株洲 412007;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;3.湖南工程学院 建筑工程学院,湖南 湘潭 411100)

摘要:为揭示降雨诱发含炭质泥岩夹层边坡的变形破坏机理,通过对株洲市蓝天花园小区边坡进行降雨量、地下水位和深层土体水平位移的监测,发现边坡不同部位地下水位变幅受降雨影响差异显著,将单孔地下水位变幅按从大到小的顺序排列,依次为滑坡后缘(变幅0.1~1.6 m)、坡体(变幅0.4~1.1 m)、坡脚(变幅0.1~0.6 m);边坡滑动面在全风化炭质泥岩夹层所在的位置。在此基础上,开展不同含水率的炭质泥岩直剪试验和边坡数值分析,结果表明:随着含水率的增加,炭质泥岩的黏聚力和内摩擦角均有所减小,夹层含水率增加和坡脚开挖均是边坡变形破坏的重要原因;随着含水率的增大,边坡塑性区面积逐渐增大,并由坡脚到软弱夹层底部再到坡顶发展贯通;最大水平位移随着夹层含水率的增大而增大,最大水平位移由第三级边坡坡脚向第二级边坡坡脚再向软弱夹层转移;坡脚开挖后,塑性区和最大水平位移的变化规律与开挖前的一致,但边坡的塑性区和最大水平位移增加得更为明显。

关键词:边坡;炭质泥岩;软弱夹层;数值模拟;变形机理

中图分类号:U213.1

文献标志码:A

The mechanism of deformation and failure of carbonaceous mudstone interlayered slopes under rainfall

XIE Teng¹, LI Zhenglong², LI Shengnan^{2,3}, LIU Xinxi², MO Xiaoqing²

(1. Zhuzhou Chengfa Urban Renewal Investment, Construction and Operation Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;
2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
3. School of Architectural Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The deformation and failure mechanism of carbonaceous mudstone interlayered slopes induced by rainfall was revealed. The slope of Lantian Garden in Zhuzhou City was monitored for rainfall, groundwater level, and horizontal displacement of deep soil layers. The groundwater level in different parts of the slope is significantly affected by rainfall, arrange the single hole groundwater level fluctuations in order of magnitude from largest to smallest, namely, landslide trailing edge (fluctuation range of 0.1-1.6 m), slope body (fluctuation range of 0.4-1.1 m), and slope toe (fluctuation range of 0.1-0.6 m). The sliding zone of the slope is located in the interlayer of fully weathered carbonaceous mudstone. Moreover, direct shear tests and numerical analysis of slopes were conducted on carbonaceous mudstones with different water contents. The results showed that as the

收稿日期:2024-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674041、52108405);湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40122);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金项目(kfj230501)

通信作者:李盛南(1989—),男,副教授,主要从事岩土体稳定性评价理论与控制方法方面的研究工作。

E-mail:2561720910@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

water content increased, the cohesion and friction angle of carbonaceous mudstones decreased. The increase in moisture content in the interlayer and excavation at the foot of the slope are important reasons for slope deformation and failure. As the moisture content of the interlayer increases, the plastic zone area of the slope gradually increases, and it develops and connects from the foot of the slope to the bottom of the weak interlayer and then to the top of the slope. The maximum horizontal displacement increases with the increase of water content in the interlayer, and the maximum horizontal displacement shifts from the foot of the third-level slope to the bottom of the second-level slope, and then to the weak interlayer. After excavation at the foot of the slope, the changes of plastic zone and maximum horizontal displacement are consistent with those before excavation. However, the increase of plastic zone and maximum horizontal displacement is more significant.

Key words: slope; carbonaceous mudstone; weak interlayer; numerical simulation; deformation mechanism

炭质泥岩在我国西南地区分布广泛^[1],是一种易风化、遇水软化易崩解的典型软岩^[2-6]。含炭质泥岩夹层边坡开挖后,降雨入渗使得边坡岩土体力学性能下降,极易诱发边坡失稳、滑坡和崩塌。与常见的均质边坡相比,含炭质泥岩夹层边坡发生地质灾害的隐蔽性更高、危害性更大。为此,揭示降雨作用下含炭质泥岩夹层边坡的变形破坏机理具有重要意义。

边坡稳定性的影响因素诸多,降雨入渗是其中一个重要因素^[7],而含软弱夹层边坡在遇到降雨时更为不利,对此已有许多学者进行了深入研究。付宏渊等^[8]研究了降雨对边坡土体含水率和基质吸力变化的影响。汪丁建等^[9]基于理论推导和数值模拟,考虑降雨引起的土体强度变化和渗透力作用,分析了降雨各阶段堆积层滑坡的变形规律。张群等^[10]基于数值分析手段及室内试验,通过考察群发性缓倾浅层土质的滑坡特性与孕育条件,研究了坡体遇强降雨时的入渗特性。唐扬等^[11]基于非饱和土模型的分析,认为降雨初期坡体含水率增长较快,边坡的稳定性变化也较大。谢瑾荣等^[12]通过分析软岩边坡在降雨渗流条件下的软化效应,认为相比于渗流效应,软化效应对边坡稳定性降低的贡献更大。YANG等^[13]基于室内模型试验探究了强降雨时含软弱夹层边坡的动力响应和稳定状况,认为夹层土体内孔隙水压力变化和水软化作用对边坡稳定不利。李龙起等^[14]探究了含软弱夹层边坡在遇到降雨时支护措施对边坡性状的有利作用。HE等^[15]探究了含软弱夹层顺层岩质边坡在遭遇不同降雨情况时的失稳过程。李盛南等^[16]研究了干湿循环作用下炭质泥岩的力学特性,并建立了细观损

伤本构方程。刘新喜等^[17]对炭质泥岩湿化变形进行了数值分析。上述研究对深入认识降雨作用下边坡变形破坏机理具有重要价值,但以往研究较少考虑炭质泥岩夹层含水率变化对边坡变形的影响。

为此,本文以株洲市蓝天花园小区边坡为依托工程,通过现场监测、室内试验和数值分析,研究降雨条件下含炭质泥岩夹层边坡的变形特性与破坏机理,为此类边坡的变形预测和稳定性评价提供参考。

1 工程背景

1.1 边坡概况

本文所研究的边坡位于株洲市枫溪大道蓝天花园小区的西南侧,城市主干道旁。滑坡区的地貌为构造剥蚀丘陵岗地。因市政道路拓宽,对原有斜坡的坡脚进行开挖,开挖深度约3.0~4.0 m,采用重力式挡土墙进行支挡。边坡施工完成后经历数个雨季,边坡顶部小区内的道路出现裂缝。滑坡前缘位于挡土墙墙脚至人行道路缘石附近,前缘挡土墙出现裂缝。

1.2 地质概况

场地出露的地层有第四系覆盖层,包括全新统和更新统,石炭系樟树湾组炭质泥岩、泥灰岩夹砂岩和冷家溪群小木坪组板岩。该边坡地质情况自上而下分为三层:①粉质黏土层:层厚4.5~6.3 m,土质结构较松散,透水性较好。②全风化炭质泥岩层:层厚4.5~8.2 m,呈黄褐色或灰褐色或灰黑色,原岩构造已被破坏,岩芯为硬塑状土。③强风化炭质泥岩层:呈灰黑色或黑色或褐黄色,岩体破碎,岩质极软,呈碎石夹土状。钻孔揭露的粉质黏土,及

全风化、强风化炭质泥岩如图 1 所示。



(a) 粉质黏土 (b) 全风化、强风化炭质泥岩

图 1 钻孔揭露的边坡地质情况

Fig. 1 The geological conditions of the slope revealed by drilling

2 边坡监测

为了解上述边坡的变形情况及发展趋势,客观评价边坡的稳定性,本文对该边坡所在区域的降雨量、边坡地下水位和深层土体水平位移进行了监测。

2.1 降雨量监测

该边坡所在区域降雨量的历时曲线见图 2。由图 2 可知,在为期 1 个月的监测期内有 11 d 在降雨,其中,小雨 5 d(降雨量<10 mm/d),中雨 3 d(降雨量为 10~25 mm/d),暴雨 3 d(降雨量为 50~100 mm/d)。暴雨发生在 2021 年 5 月 11 日、5 月 16 日和 5 月 19 日,降雨量分别为 94.1、74.3、54.4 mm。

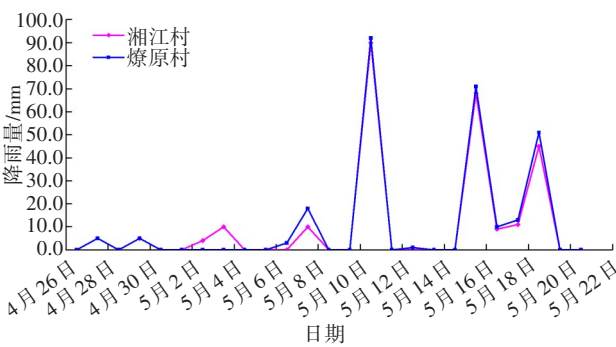


图 2 降雨量历时曲线

Fig. 2 Rainfall duration curve

2.2 地下水位监测

对边坡地下水位进行监测,结果见表 1。由表 1 可知,坡脚(滑坡前缘)的地下水位埋深浅、变幅小。坡脚地下水位埋深为 0.1~1.5 m,单孔地下水位变幅为 0.1~0.6 m。滑坡后缘地下水位变化区间为 1.5~3.7/2.5~3.8 m,差值为 2.2/1.3 m,单孔地下水位变幅为 0.1~1.6 m。坡体地下水位埋深为 2.7~7.0 m,差值为 4.3 m,地下水位变化区间为 2.7~5.9/3.6~7.0 m,差值为 3.2/3.4 m,水位变幅为 0.4~1.1 m。将单孔地下水位变幅从大到小排列,依次为滑坡后缘、坡体、坡脚,这是因为受岩土体透水性的影响,空隙、裂隙相对发育的透水性好的岩土体,其渗透、排泄条件较

表 1 边坡地下水位监测

Table 1 Groundwater level monitoring of the slope

m

滑坡	孔号	地下水位埋深									水位变化			
											单孔		滑坡部位	
		5月 3日	5月 4日	5月 5日	5月 7日	5月 8日	5月 9日	5月 13日	5月 17日	5月 20日	区间	变幅	区间	差值
坡脚	CX4	0.9	0.9	0.9	0.9		1.3		0.7	0.9	0.7~1.3	0.6	0.1~1.2/ 0.3~1.5	1.1/ 1.2
	CX5	0.2	0.3	0.2	0.2		0.2		0.3	0.3	0.2~0.3	0.1		
	CX9	1.0	1.0	0.9	0.9		1.1		0.8	0.9	0.8~1.1	0.3		
	CX10	1.4	1.3	1.4	1.5		1.4		1.2	1.5	1.2~1.5	0.3		
	CX13	0.1	0.2	0.2	0.2		0.3		0.4	0.2	0.1~0.4	0.3		
	CX14	0.3	0.3	0.4	0.5		0.4		0.6	0.5	0.3~0.6	0.3		
	SW4	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8		0.7	0.8	0.7~0.9	0.2		
滑坡后 缘	ZK29					3.7	3.8			3.8	3.7~3.8	0.1	1.5~3.7/ 2.5~3.8	2.2/ 1.3
	CX1	3.1	3.1	3.1		2.0	1.5				1.5~3.1	1.6		
	CX11	2.1	2.2	2.3	2.2	2.3	2.4		2.0	2.5	2.0~2.5	0.5		
坡体	ZK28					3.8	4.1		4.2	4.2	3.8~4.2	0.4	2.7~5.9/ 3.6~7.0	3.2/ 3.4
	CX2	5.9	6.9	7.0		6.8	6.9				5.9~7.0	1.1		
	CX6	4.8	4.8	4.3		4.5	3.9		3.8	3.7	3.7~4.8	1.1		
	CX7	3.0	3.0	2.9		3.6	2.7		3.2	3.5	2.7~3.6	0.9		
	CX12	3.3	3.2	3.5	3.5	3.8	3.8		3.7	3.9	3.2~3.9	0.7		
	SW2	4.3	4.3	4.2	4.5	4.3	4.3		4.1	4.4	4.1~4.5	0.4		

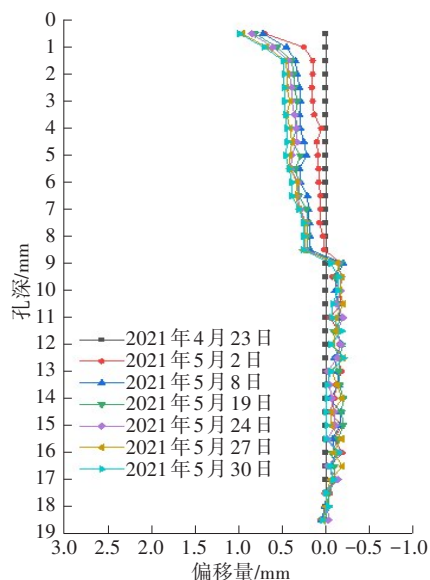
注:倒数第二列“/”前后的数值分别代表各钻孔最低、最高地下水位区间,最后一列“/”前后的数值分别代表最低、最高地下水位区间跨度。

好。因此,在斜坡区岩土体中地下水水位埋深较大,与坡脚地下水水位埋深的高差较小。如素填土结构松散,孔隙发育,透水性好,故素填土区斜坡上钻孔的水位标高比坡脚的高,而非素填土区斜坡上钻孔的水位可高出坡脚钻孔水位6.0 m以上。

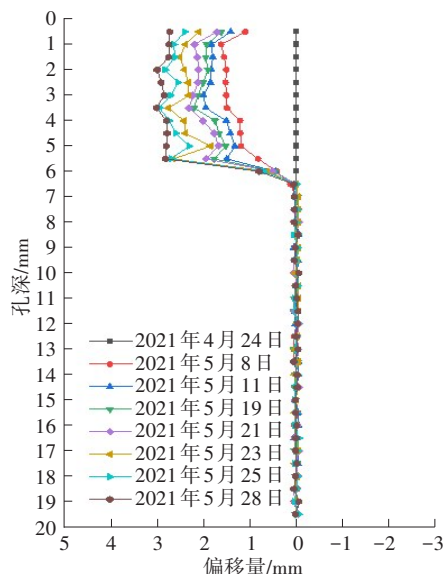
此外,受降雨影响地下水位会发生变动。钻孔水位对降雨的响应比较敏感,雨后当天或次日一般都会有不同程度的上升,如2021年5月8日、5月11日、5月16日和5月19日(见表1和图2)的雨后,钻孔水位均有所上升。同时,斜坡上的地下水排泄条件较好,降雨后的次日水位大多开始下降。

2.3 深层土体水平位移监测

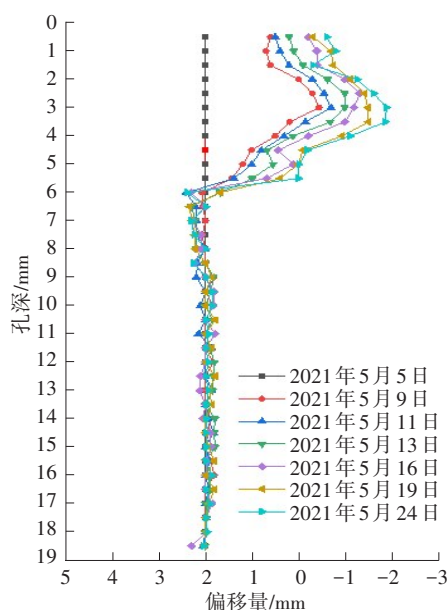
在边坡深层土体典型钻孔监测到的水平位移如图3所示。



(a) 钻孔 CX2



(b) 钻孔 CX12



(c) 钻孔 ZK28

图3 深层土体水平位移

Fig. 3 Horizontal displacement of deep soil

由图3可知,钻孔CX2、CX12和ZK28均有明显的位移,位移幅度约为1.0~4.0 mm,其中钻孔ZK28的位移幅度最大,达到了4.0 mm左右;各孔埋深分别为8.5、6.5和6.0 m左右,与炭质泥岩夹层的位置极为吻合。由此可见,边坡的滑带位置在全风化炭质泥岩层。此外,ZK28钻孔位于边坡左侧缘,滑坡体中部向前推移使得其侧缘相对后移,因此深层土体水平位移的监测结果出现了负位移。

3 炭质泥岩力学试验

对从钻孔取得的全风化炭质泥岩进行直剪试验,剪切仪的转速为8 rad/min。现场测得全风化炭质泥岩的天然含水率为15.3%,饱和含水率为29.8%。为研究不同含水率下炭质泥岩的抗剪力学参数,配制含水率分别为18.0%、21.0%、24.0%、27.0%、30.0%的5种试样,对天然全风化炭质泥岩试样及上述配制的5种试样(共6种)进行直剪试验。烘干后的剪切试样如图4所示。

含水率分别为15.3%、18.0%、21.0%、24.0%、27.0%、30.0%的全风化炭质泥岩的抗剪强度结果见表2。全风化炭质泥岩的天然含水率为15.3%,当含水率从15.3%增加至30.0%时,黏聚力从45.5 kPa减小至28.5 kPa,内摩擦角从20.3°减小至14.5°。受炭质泥岩性质和矿物成分的影响,炭质泥岩的黏聚

力和内摩擦角均随着含水率的增大而降低,其中炭质泥岩接近饱和(含水率为 30.0%)时的黏聚力和内摩擦角均比天然含水状态下的减小了约 1/3。

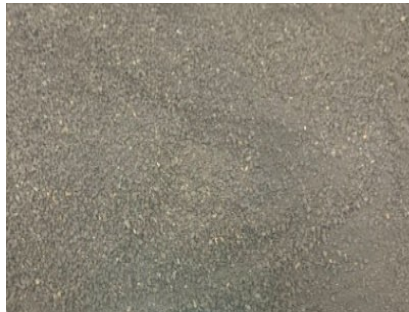


图 4 烘干后的全风化炭质泥岩

Fig. 4 Fully weathered carbonaceous mudstone after drying

表 2 全风化炭质泥岩试验结果

Table 2 Test results of fully weathered carbonaceous mudstone

含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
15.3	20.50	45.5	20.3
18.0	20.56	41.6	18.5
21.0	20.63	38.1	17.7
24.0	20.70	34.4	16.4
27.0	20.76	31.3	15.2
30.0	20.80	28.5	14.5

4 边坡稳定性数值分析

4.1 边坡数值模型

本文所研究的边坡长 80.0 m,高 40.0 m,一、二、三级边坡顶面的宽度分别为 10.0、25.0 和 27.0 m,一级边坡的放坡高度为 10.0 m,二、三级边坡的放坡高度均为 5.0 m,一、二级边坡的坡率均为 1:1,三级边坡的坡率为 1:0.5。二、三级边坡顶部分别建有 3 层砖混结构和 3 层框架结构房屋。坡体内部含炭质泥岩软弱夹层,边坡顶部到软弱夹层最上端的距离为 10.0 m,全风化炭质泥岩软弱夹层的厚度从上部的 2.5 m 向下逐渐增厚,最厚处达到了 8.0 m,坡脚开挖使其下部暴露在空气中。取坡脚以下 20.0 m 的岩层进行数值分析。

根据边坡实际几何尺寸和地质条件,本文通过 ABAQUS 软件构建该边坡典型特征剖面的二维数值模型,模型共有 2 816 个单元、2 312 个节点,在模型底部及左、右边界(沿 x 轴方向)均施加固定约束。采用理想弹塑性本构模型及摩尔-库伦准则进行计算。将边坡顶部的砖混、框架结构房屋荷载简化为

均布荷载,分别为 450、400 kPa。边坡岩土体的物理力学参数见表 3,坡体的简化计算模型如图 5 所示。

表 3 边坡岩土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass of the slope

岩土体名称	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
粉质黏土	20.0	49.8	20.5	8.40	0.27
强风化炭质泥岩	24.2	56.5	31.5	30.0	0.34

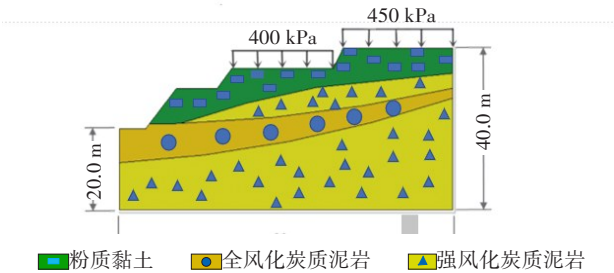


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical simulation model

根据软弱夹层的含水率及各层岩土体的弹性力学参数和强度参数,按 1%~2% 折减粉质黏土和强风化炭质泥岩在上述 6 种含水率下的强度参数,结果见表 4~5。以这些参数为基础,建立有限元模型,讨论边坡在降雨入渗情况下的变化过程,并分析边坡的稳定性。

表 4 折减后的粉质黏土参数

Table 4 Reduced parameters of silty clay

含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
15.3	20.0	49.80	20.50
18.0	20.2	48.80	20.09
21.0	20.4	47.81	19.68
24.0	20.6	46.81	19.27
27.0	20.8	45.82	18.86
30.0	21.0	44.82	18.45

表 5 折减后的强风化炭质泥岩参数

Table 5 Reduced parameters of heavily weathered carbonaceous mudstone

含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
15.3	24.20	56.50	31.60
18.0	24.44	55.37	30.97
21.0	24.68	54.24	30.34
24.0	24.93	53.11	29.70
27.0	25.42	51.98	29.07
30.0	25.41	50.85	28.44

4.2 结果分析

1) 塑性区特征分析。

坡脚未开挖时不同含水率下边坡塑性区的变化如图6所示。由图6可知,在天然含水率下,受角点集中应力作用的影响,边坡坡脚夹层首先出现塑性区,并有向斜后方发展的趋势;当含水率为21.0%时,坡脚夹层的塑性区面积扩大并向边坡斜上方发展;当含水率为30.0%时,软弱夹层接近饱和状态,坡脚塑性区进一步扩大,塑性区沿着软弱夹层向边坡内部发展,并出现坡体沿软弱夹层滑动的趋势,此时的塑性应变达到最大值。

坡脚开挖后不同含水率下边坡的塑性应变如图7所示。由图7可知,塑性区域的整体变化趋势与坡脚未开挖时的相似,即随着夹层含水率的增大,塑性区面积增大,且由坡脚向坡体内部贯通发展。坡脚开挖后最先出现塑性区的部位是坡脚。随着夹层含水率的增大,塑性区从软弱夹层逐渐向

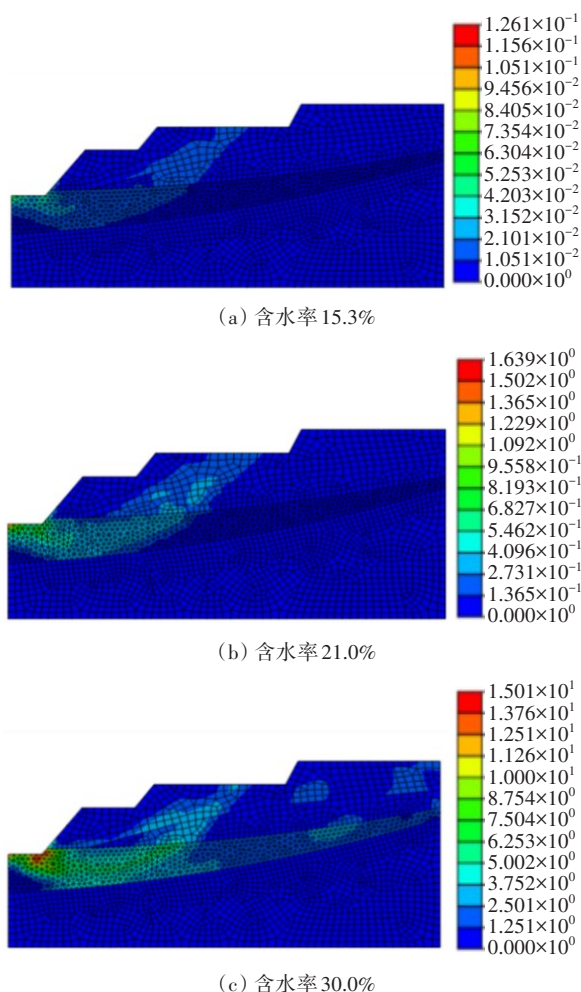


图6 坡脚未开挖时不同含水率下边坡的塑性应变

Fig. 6 Plastic strain of the slope under different moisture contents before excavation at the foot of the slope

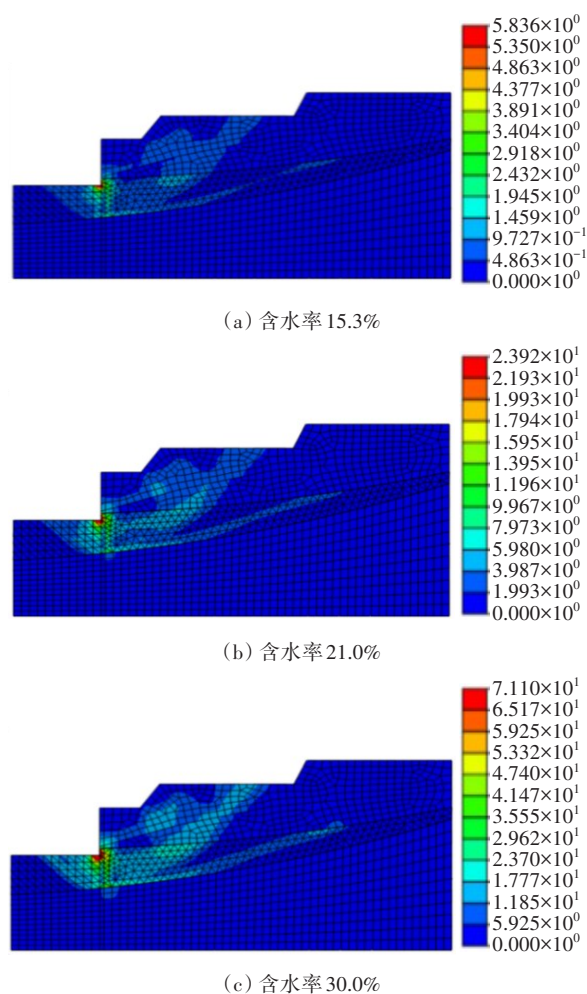


图7 坡脚开挖后不同含水率下边坡的塑性应变

Fig. 7 Plastic strain of the slope under different moisture contents after excavation at the foot of the slope

坡体中上部和顶部贯通,并向下扩大,坡体出现沿软弱结构面向下滑动的趋势。

2) 水平位移特性分析。

坡脚未开挖时,不同含水率下边坡的水平位移如图8所示。由图8可知,当含水率为天然含水率15.3%时,水平位移最大值出现在第三级边坡坡脚;随着含水率的增大,水平位移最大值逐渐转移到第二级边坡坡脚的软弱夹层部位,并以此为中心向四周扩展;另外,软弱夹层影响了其上下方岩土体水平位移变化的连续性,软弱夹层上方岩土体的位移明显大于其下方岩土体的位移,出现了上部坡体沿着软弱夹层滑动的趋势。当含水率为30.0%时,软弱夹层接近饱和状态,以软弱夹层为界,其上下方岩土体水平位移的差异达到最大,软弱夹层上方岩土体的水平位移达到了最大值2.0 cm,其下方岩土体的水平位移最大值仅为1.3 cm,边坡出现明显滑动。

坡脚开挖后,不同含水率下边坡的水平位移如图9所示。由图9可知,水平位移最大值均出现在坡脚开挖后的临空面,其次为第三级边坡坡脚处。当含水率从15.3%增加到30.0%时,最大水平位移从12.45 cm增加到了18.25 cm,增幅46.4%。由此可见,软弱夹层在被水软化后其强度急剧下降,夹层上下岩土体的水平位移发生突变,上部坡体沿

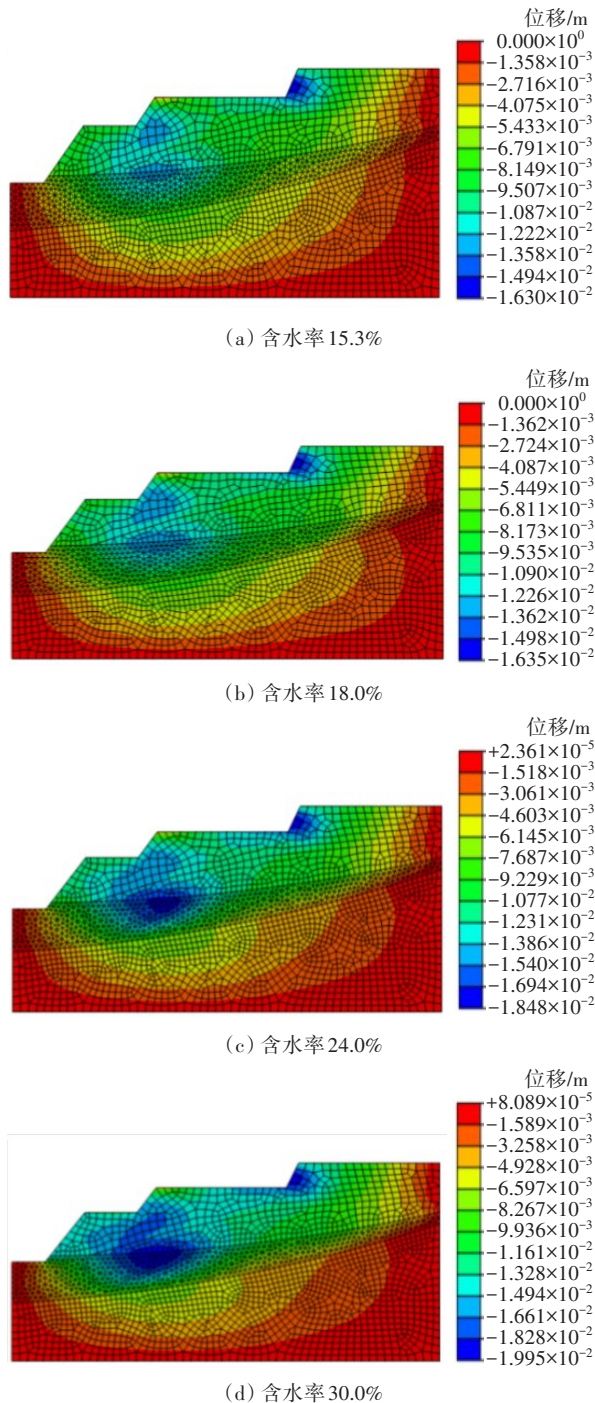


图8 坡脚未开挖时不同含水率下边坡的水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of the slope under different moisture contents before excavation at the foot of the slope

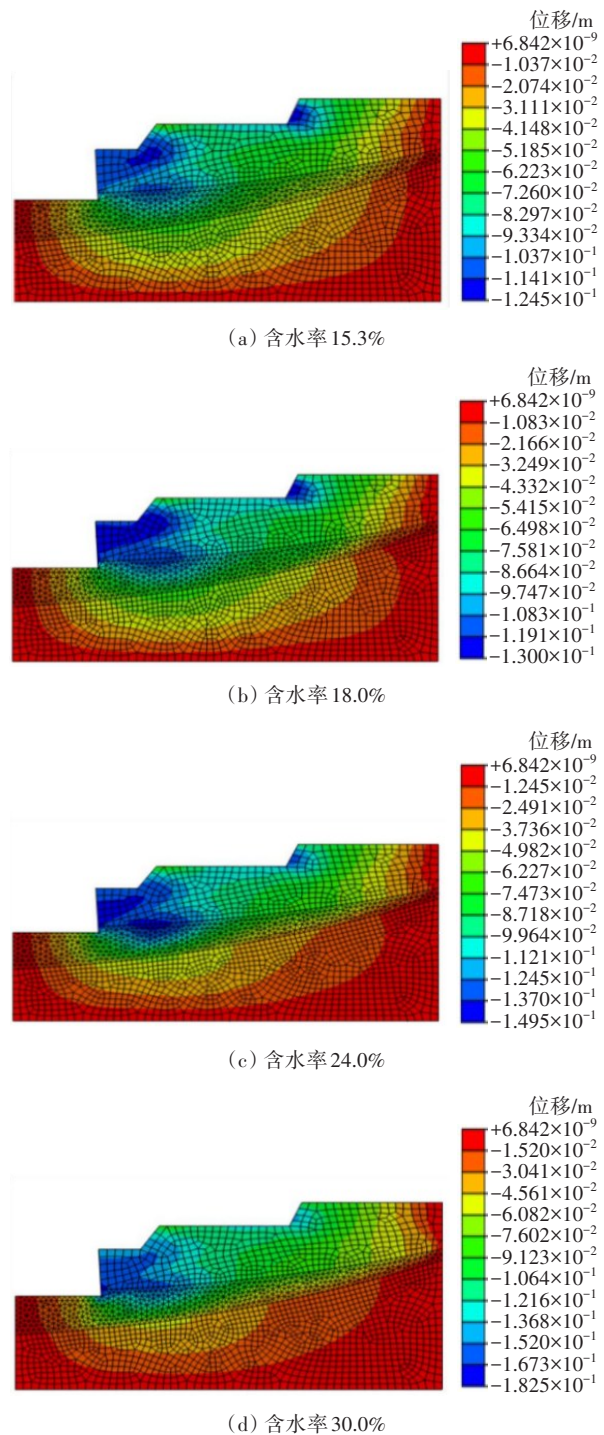


图9 坡脚开挖后不同含水率下边坡的水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of the slope under different moisture contents after excavation at the foot of the slope

夹层底面发生整体滑动,滑坡趋势十分明显。

3) 对比分析。

未开挖与开挖坡脚两种工况下边坡的塑性应变与水平位移对比如图10~11所示。由图10~11可知,在这两种工况下,边坡的最大塑性应变和最大水平位移均随着炭质泥岩夹层含水率的增大而

增大,其中坡脚开挖后的最大塑性应变和最大水平位移均比未开挖时的大;且含水率越高,这两种工况下的最大塑性应变差值和最大水平位移差值均越大。例如,当夹层含水率为24.0%时,坡脚开挖后比未开挖时的最大塑性应变增大了18.8,最大水平位移增大了0.4 cm;而当夹层含水率为30.0%时,坡脚开挖后比未开挖时的最大塑性应变增加了61.2,最大水平位移增大了1.1 cm。说明边坡稳定性受夹层湿化和坡脚开挖的影响,坡脚开挖后边坡塑性区发展更快,边坡发生破坏的时间更短。

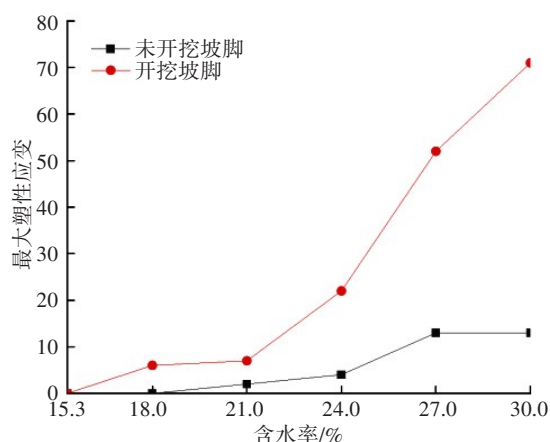


图10 塑性应变对比

Fig. 10 Comparison of plastic strain

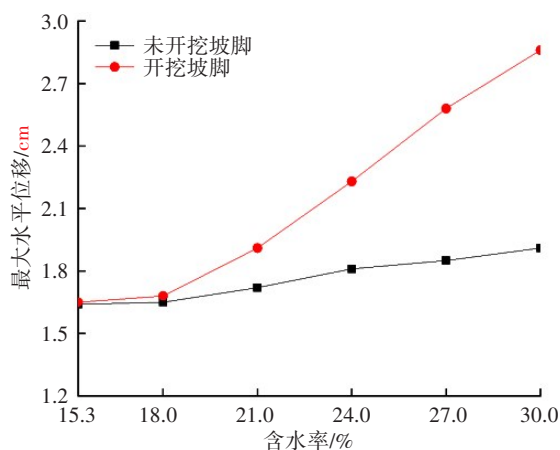


图11 水平位移对比

Fig. 11 Comparison of horizontal displacement

5 结论

1) 受炭质泥岩夹层分布的影响,边坡不同部位的地下水位受降雨影响差异显著,将地下水位变幅按从大到小的顺序排列,依次为滑坡后缘、坡体、坡脚。

2) 地下水位变化区域与边坡滑动面所在区域的深度相近,均在全风化炭质泥岩层。可见,炭质泥岩夹层是边坡滑移带萌生的重点区域。

3) 随着含水率的增加,炭质泥岩的黏聚力和内摩擦角均有所减小。与天然含水状态相比,炭质泥岩接近饱和状态时的黏聚力和内摩擦角均减小了约1/3。

4) 夹层含水率增大和坡脚开挖均是诱发边坡发生变形破坏的重要因素。而由坡脚开挖引起的边坡塑性区和最大水平位移增大更为明显,因此坡脚开挖是边坡变形破坏的主要原因。

参考文献(References):

- [1] GUO T L. Evaluation of highly thermally mature shale-gas reservoirs in complex structural parts of the Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 863-873. DOI: 10.1007/s12583-013-0384-4.
- [2] 付宏渊, 邱祥, 李光裕, 等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- FU Hongyuan, QIU Xiang, LI Guangyu, et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- [3] 李盛南, 梁桥, 刘新喜, 等. 干湿循环作用下炭质泥岩溶蚀孔隙度的化学计量方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 89-96. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.02.007.
- LI Shengnan, LIANG Qiao, LIU Xinxi, et al. A stoichiometric method for dissolution porosity of carbonaceous mudstone under dry and wet cycles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 89-96. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.02.007.
- [4] 曾铃, 史振宁, 付宏渊, 等. 预崩解炭质泥岩路用性能及其基于三轴CT试验的力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2030-2036. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.06.029.
- ZENG Ling, SHI Zhenning, FU Hongyuan, et al. Road performance of preliminary disintegration of carbon mudstone and mechanical characteristics based on CT-Triaxial test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(6): 2030-2036. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.06.029.
- [5] 李盛南, 刘新喜, 李玉, 等. 炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 99-107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.007.
- LI Shengnan, LIU Xinxi, LI Yu, et al. Study on the

- deformation characteristics and damage evolution law of the progressive failure process of carbonaceous mudstone [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (4): 99-107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.007.
- [6] 刘新喜, 李盛南, 徐泽佩, 等. 高应力泥质粉砂岩黏弹塑性蠕变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1210-1220. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.05.025.
- LIU Xinxi, LI Shengnan, XU Zepai, et al. Viscoelastic-plastic creep model of high stress argillaceous siltstone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1210-1220. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.05.025.
- [7] 苏永华, 李诚诚. 强降雨下基于Green-Ampt模型的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 389-398. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0001.
- SU Yonghua, LI Chengcheng. Stability analysis of slope based on Green-Ampt model under heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 389-398. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0001.
- [8] 付宏渊, 陈镜丞, 曾铃, 等. 降雨对炭质泥岩-土分层路堤渗流与变形影响的模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- FU Hongyuan, CHEN Jingcheng, ZENG Ling, et al. Model test on effect of rainfall on seepage and deformation of carbonaceous mudstone-soil stratified embankment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- [9] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.017.
- WANG Dingjian, TANG Huiming, LI Changdong, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439-445. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.017.
- [10] 张群, 许强, 李江, 等. 南江“9·16”群发性缓倾浅层土质滑坡特征与成因机制研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 104-111. DOI: 10.13577/j.jnd.2015.0314.
- ZHANG Qun, XU Qiang, LI Jiang, et al. Study on characteristics and cause mechanism of grouping inclined-shallow soil mass landslides on September 16, 2011 in Nanjiang [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3): 104-111. DOI: 10.13577/j.jnd.2015.0314.
- [11] 唐扬, 殷坤龙, 夏辉. 前期含水率对浅层滑坡降雨入渗及稳定性影响研究[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 204-208, 237. DOI: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0527.
- TANG Yang, YIN Kunlong, XIA Hui. Effects of initial water content on the rainfall infiltration and stability of shallow landslide [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5): 204-208, 237. DOI: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0527.
- [12] 谢瑾荣, 周翠英, 程晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 197-203, 210. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.01.005.
- XIE Jinrong, ZHOU Cuiying, CHENG Ye. Method of seepage-softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 197-203, 210. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.01.005.
- [13] YANG Y C, XING H G, YANG X G, et al. Experimental study on the dynamic response and stability of bedding rock slopes with weak interlayers under heavy rainfall [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(12): 433. DOI: 10.1007/s12665-018-7624-y.
- [14] 李龙起, 罗书学, 魏文凯, 等. 降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1772-1778. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.09.006.
- LI Longqi, LUO Shuxue, WEI Wenkai, et al. Model tests of rainfall infiltration effect on bedding rock slope with weak interlayer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1772-1778. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.09.006.
- [15] HE Z M, WANG B L. Instability process model test for bedding rock slope with weak interlayer under different rainfall conditions [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 8201031. DOI: 10.1155/2018/8201031.
- [16] 李盛南, 肖俊, 李玉, 等. 基于细观裂纹扩展演化的岩石损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 640-648. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0364.
- LI Shengnan, XIAO Jun, LI Yu, et al. A new damage constitutive model of rock considering microscopic crack growth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 640-648. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0364.
- [17] 刘新喜, 邓子君, 李盛南, 等. 炭质泥岩路堑边坡湿化变形模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.001.
- LIU Xinxi, DENG Zijun, LI Shengnan, et al. Simulation analysis of wetting deformation of carbonaceous mudstone cutting slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.001.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:冯硕)