

文章编号:1671-8879(2017)06-0001-08

黄土边坡降雨冲刷试验及颗粒流模拟

吴 谦¹,王常明²,李同录³,毛雪松¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 吉林大学 建设工程学院,吉林 长春 130026;
3. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:为了研究公路工程中黄土边坡的冲刷破坏特征及演化机制,以辽宁西部黄土边坡为研究对象,进行边坡冲刷破坏的室内物理模型试验;监测降雨过程中边坡土体的含水率,分析其雨水入渗规律;以试验为基础,基于水-土耦合理论,借助三维颗粒流程序 PFC^{3D}对边坡降雨冲刷过程进行模拟,得到冲刷破坏过程中边坡不同部位土体孔隙率、水流流速、颗粒平均运动速度的分布及变化过程。研究表明:在降雨过程中坡脚的浸润范围明显大于其他部位,且这种趋势随着降雨的进行愈发明显;坡面冲刷破坏的演变过程可归结为溅蚀、片蚀→细沟冲蚀→切沟冲蚀→坍塌,坍塌过程由坡脚向上发展,呈牵引式破坏特征,直至边坡完全破坏;随着冲刷的进行,颗粒流失从坡顶到坡脚呈增加趋势,从坡顶到坡脚水流速度呈增大趋势,伴随着单元内颗粒的滑动,流速曲线局部出现峰值,各流体单元内颗粒运动速度的变化特征与水流流速的变化特征相似。颗粒流模拟获得的参数反映出降雨过程中水流侵蚀能力及土体侵蚀强度在坡体内的分布特征:从坡顶到坡脚的水流侵蚀能力呈递增趋势,坡脚处侵蚀破坏最为严重,模拟结果与室内模型试验结果基本吻合,可从细观层面对模型试验做出补充。

关键词:道路工程;黄土边坡;冲刷侵蚀;水-土耦合;三维颗粒流

中图分类号:U416.169

文献标志码:A

Test on rainfall erosion of loess slope and its simulation by PFC^{3D}

WU Qian¹, WANG Chang-ming², LI Tong-lu³, MAO Xue-song¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: To study the rainfall erosion characteristics and its evolution mechanism of loess slope in highway engineering. Taking loess slope in western Liaoning as the research object, physical model test was conducted in laboratory. Moisture content of slope soil during rainfall was monitored and migration law of wetting front in slope was analyzed. Based on the test results and water-soil coupling theory, the rainfall erosion process of slope was simulated by PFC^{3D}, and the void ratio in different positions of slope during rainfall erosion, water flow rate and the distribution and changing process of particle average moving rate were obtained. The results show that the infiltration area at slope toe is larger than the other positions, and with the rainfall this trend is more and more obvious. The evolution of erosion process can be generally concluded

收稿日期:2017-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目(40972171,51378072);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161023,310821162012)

作者简介:吴 谦(1989-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:282497832@qq.com。

as splash and sheet erosion, rill erosion, gully erosion and finally evolved into collapse. The collapse was retrogressively developing upwards, until the slope completely destroyed. Loss of particles and the water flow rate both increased from the top of the slope to the slope toe as the erosion progressed. With the particles sliding, there will be local peaks on the water flow rate curve, and particle moving in each fluid unit exhibited similar variation characteristics with the water flow rate. These parameters obtained from PFC^{3D} simulation the distribution of erosion capacity of water flow and soil erosion intensity in slope, the erosion capacity of water flow was increasing from top to toe of the slope, and the soil erosion intensity at toe of the slope was the most serious place, which was consistent to the result of laboratory model test, also was a supplement for model test on meso perspective. 1 tab, 10 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; loess slope; rainfall erosion; water-soil coupling; PFC^{3D}

0 引言

边坡冲刷破坏是一个世界性课题,在地中海地区^[1-2]、美国西北部^[3]、德国北部^[4]以及中国^[5-7]等广泛存在,其主要涉及生态系统防护、农业、以及公路、铁路等领域,相对来看,目前此类问题的研究多集中于生态防护和农业领域。

坡面冲刷是一个复杂、连续的过程。在降雨过程中坡面一般会经历雨滴溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、切沟侵蚀等阶段,其中溅蚀、片蚀属于坡面流侵蚀阶段,细沟、切沟侵蚀则属于沟道侵蚀阶段。目前对边坡冲刷破坏的研究基本可分为2个方面:降雨强度^[8]、坡度^[5]以及土体自身性质^[9-10]等因素对土壤侵蚀影响机制的研究,降雨强度和坡度是边坡侵蚀的2个重要影响因素,降雨强度、坡度越大,边坡侵蚀越强烈,边坡土体级配越好,越容易发生侵蚀;植被防护或土体改良后边坡抗冲刷能力研究。Liu等对6种植被覆盖下边坡的抗冲刷能力进行了研究,发现在降雨过程中青草、灌木混种可以有效提高边坡的抗侵蚀能力^[6];卢浩等研究发现麦秸秆加筋黄土的抗冲刷效果明显,且随着降雨历时的增长,其抗冲刷效果会更明显^[11];裴向军等研究发现,经过改性纳铵甲基纤维素(CMC)胶结固化后的土质边坡,能有效防止坡面冲沟发育,减缓边坡水土流失,增强其抗冲刷性能^[12]。工程上,学者们往往更重视在降雨入渗作用下边坡的稳定情况^[13-14],然而在降雨过程中边坡实际受到雨水入渗和冲刷的双重破坏作用^[15],目前从此角度研究降雨对边坡破坏作用的结果并不多见。

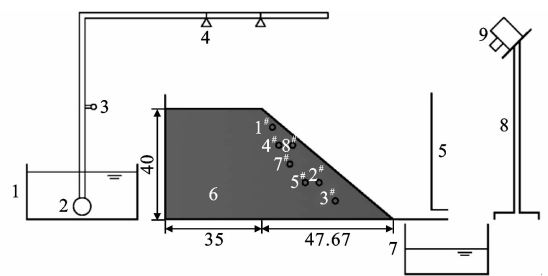
在干燥情况下,黄土具有较高的强度,边坡稳定性较好,这就造成黄土地区公路工程建设中常会产生大量无防护的裸露边坡。然而,黄土结构

特殊,水敏感性极强,在长期冲刷过程中,坡面冲沟极其发育,甚至引起边坡的整体失稳,严重影响路线的安全运营。辽宁西部地处黄土边缘区,目前对其研究并不充分^[16-18]。另外,目前的理论分析或试验研究基本都是从宏观出发,忽略了冲刷过程中细观层次上土颗粒的运动,以及水-土颗粒的相互作用过程。鉴于此,本文以辽西黄土为研究对象,借助室内模型试验对边坡在降雨条件下的侵蚀破坏过程进行研究,在试验基础上,基于水-土耦合理论,对边坡冲刷破坏过程进行三维颗粒流模拟,以期揭示黄土边坡冲刷破坏机制,为工程病害防治提供参考。

1 边坡冲刷破坏的室内模型试验

1.1 试验装置

试验装置(图1)由人工降雨设备、试验槽、沉砂池3个主要部分组成,并配备了数字影像实时监测系统 and 体积含水率采集系统。



1.蓄水池;2.潜水泵;3.压力表;4.降雨单元;5.模型箱;
6.边坡模型;7.沉砂箱;8.摄像云台;9.摄像机

单位:cm

图1 试验装置

Fig.1 Test equipment

试验采用辽西黄土,其基本物理力学指标见文献^[19],试验中边坡坡度为 40° ,边坡模型密度为85%左右,坡顶汇水面积为 $48\text{ cm}\times 35\text{ cm}$,见图1。

1.2 边坡土体的降雨入渗规律

试验降雨强度为 2.7 mm/min , 试验过程中对边坡不同部位(1#~8# 探头位置见图1)土体的体积含水率进行监测, 结果见图2。

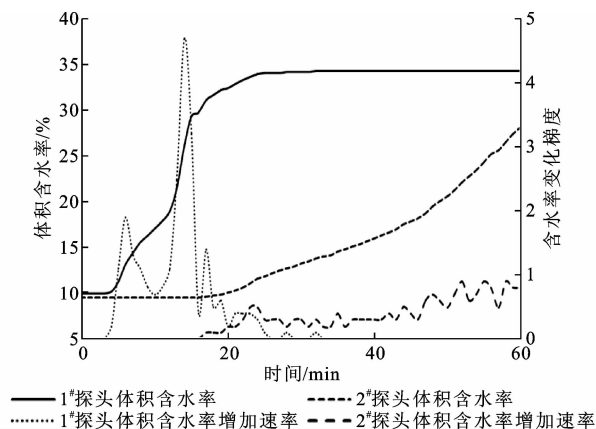


图2 不同位置土体含水率变化曲线

Fig. 2 Curves of moisture content in soil of different positions of slope

从图2可知:降雨开始后较短时间内,湿润锋便到达浅部监测点处,土体含水率快速从初值增加至饱和含水率,之后基本保持恒定。如坡面浅埋的1#探头,降雨开始后约3 min,湿润锋到达1#探头处,土体含水率随即开始增加,含水率增速也开始增加;随着降雨的进行,在14 min时含水率增速达到峰值,随后开始减小,含水率曲线逐渐平缓;24 min时

土体饱和,之后含水率基本恒定。坡体较深处土体含水率增长相对缓慢,增速也相对较小,如7#探头。说明入渗路径对土体含水率具有一定控制作用,距离入渗面越近则土体含水率的增速和增幅就越大。

除了入渗路径,重力对坡体内水分场分布特征的影响也会随降雨的进行逐渐显现。试验过程中通过试验槽侧面有机玻璃对坡体内不同时刻湿润锋位置进行了记录。可以看出:随着降雨时间 t 的增加,雨水的浸润范围不断扩展,受入渗路径控制,湿润锋基本与坡面平行;坡脚处雨水的浸润范围大于坡体其他部位,并且随着降雨进行,这种趋势愈发明显^[19],这是由于坡脚除了受降雨直接入渗以外,边坡上部土体中的雨水在重力驱使下也不断向此处聚集,软化土体并削弱土颗粒的抗冲刷能力,表明在降雨过程中坡脚处的冲刷破坏更严重。

1.3 边坡冲刷破坏过程特征

对边坡的冲刷破坏过程进行了实时观测,见图3,本次试验中边坡的冲刷破坏过程基本可总结为:溅蚀、片蚀→细沟侵蚀→切沟侵蚀→坍塌。

试验初期为溅蚀、片蚀阶段。表层土体受雨滴击打,结构发生破坏,土颗粒分散,部分颗粒还会随雨滴溅落在四周,这些雨滴击溅产生的泥浆逐渐填充表层土体中的孔隙,坡面出现结皮现象,雨水入渗能力减弱,坡面出现薄层水流,形成片蚀,片蚀过程

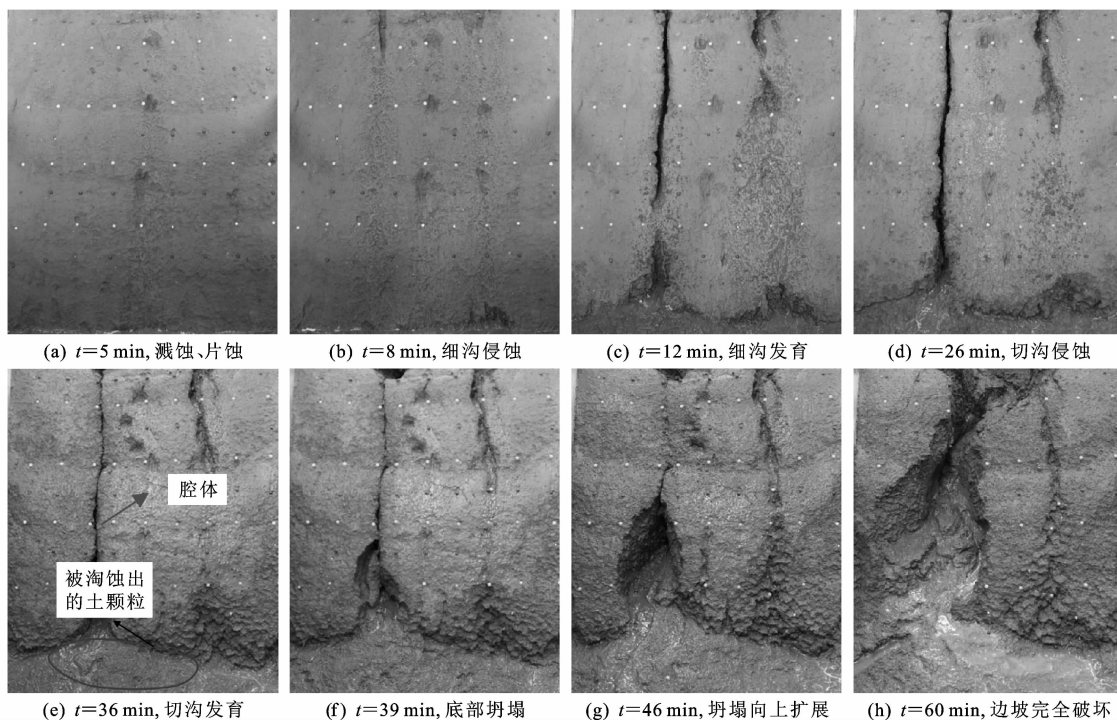


图3 边坡冲刷破坏演变过程

Fig. 3 Evolution process of rainfall erosion of slope

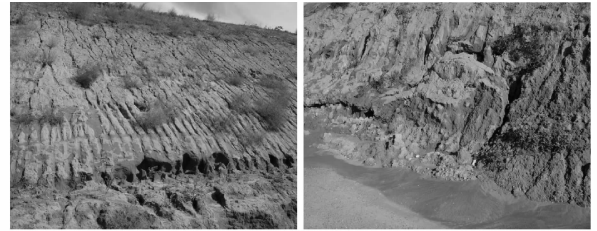
中运移的物质主要是被雨滴溅散的土颗粒。此过程中水流能量较小,侵蚀能力弱,仅在坡面留下一些鳞片状小沟痕[图 3(a)]。降雨过程中在坡面没有出现细沟或细沟之间的区域土体的侵蚀。

随着降雨的持续,土体含水率增加使得雨水入渗能力持续减小,坡面径流量增加,在抗侵蚀能力较弱的部位出现明显的沟槽痕迹,沟槽的出现为水流汇集提供了便利条件,坡面进入细沟侵蚀阶段[图 3(b)]。汇集的水流对片蚀产生的一些侵蚀穴进行淘蚀、溯源侵蚀,加之其对沟槽的下切侵蚀,细沟规模越来越大,并逐渐上下连通。在试验过程中还发现由于水流的溯源侵蚀使得坡脚处土颗粒不断被冲蚀带走,遭受强烈侵蚀,坡脚不断向后推移。

此后坡脚处出现切沟[图 3(d)],切沟侵蚀过程中水流具有很强的侵蚀能力,其在强烈下蚀坡脚的同时也在不断淘蚀沟槽底部的土颗粒,大量土颗粒流失导致沟槽内部出现一个腔体[图 3(e)],由于内部被掏空,腔体逐渐闭合。与此同时,由于沟槽两侧土体饱和且强度极低,在水力、重力侵蚀双重作用下坡脚发生坍塌[图 3(f)],导致上部土体失去支撑,坍塌沿沟槽向上扩展[图 3(g)],直至边坡完全破坏。

辽西公路边坡野外冲刷破坏典型现象如图 4 所示,图 4 中边坡坡度为 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。图 4(a)中坡面细沟发育,坡脚处侵蚀较严重,坡脚明显向后推移,室

内试验也发现类似现象;图 4(b)为降雨导致坡脚处水流汇集,土体含水率较高强度极低,坡脚土体坍塌,室内试验同样发现在冲刷破坏后期,径流和重力的双重作用下使得坡脚处首先发生坍塌。室内试验与野外现场观测结果有较好的一致性。



(a) 坡面发育的细沟

(b) 坡脚坍塌

图 4 辽西公路边坡冲刷破坏

Fig. 4 Erosion of highway loess slope in western Liaoning

2 边坡冲刷破坏的颗粒流模型

2.1 边坡模型

边坡数值模型和室内模型尺寸相同,试验槽尺寸为 1 m (长) $\times 0.48\text{ m}$ (宽) $\times 0.4\text{ m}$ (高)。为避免颗粒数过大引起的计算效率低下和不收敛等问题,模型中粒径相似比取 10,粒径区间为 $0.01\sim 20\text{ mm}$,颗粒总数为 7 145。模型中各种参数见表 1。为方便观察不同部位颗粒冲刷破坏情况,将模型中颗粒分层赋予不同灰度,见图 5。

表 1 颗粒流模型细观参数

Tab. 1 Micromechanics parameters of PFC^{3D} model

参数	颗粒							墙			水				
	粒径/ mm	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	法向 刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向 刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	法向黏 结强度/ N	切向黏 结强度/ N	摩擦 因数	法向 刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向 刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	摩擦 因数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏滞 系数/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	流体单元 网格尺寸/cm		
参数值	0.01~20	2 650	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	0.5	1.0×10^6	1.0×10^6	0.3	1.0×10^3	0.001	8.3	8	8

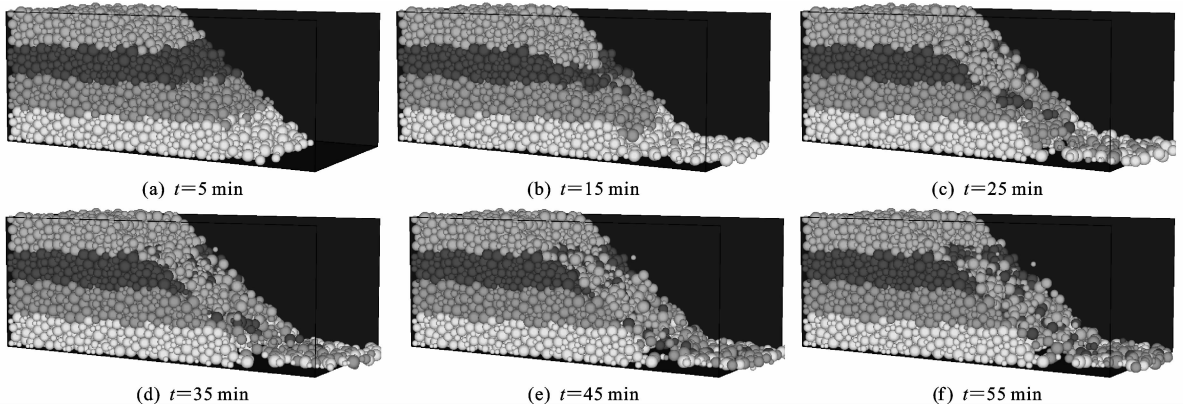


图 5 不同时刻边坡的冲刷破坏形态

Fig. 5 Erosion shapes of slope at different moments

2.2 水-土耦合计算基本原理

水-土耦合计算的关键在于求解 Euler-Des-cartes 坐标系下的流体连续性方程和纳维-斯托克斯(N-S)方程。

2.2.1 流体的连续性方程和 N-S 方程

密度恒定不可压缩流体的连续性方程和 N-S 方程为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{nu} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{nu}}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{nuu} - \frac{n}{\rho_f} \nabla p - \frac{n}{\rho_f} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + n\mathbf{g} + \frac{\mathbf{f}_{int}}{\rho_f} \quad (2)$$

式中: n 为孔隙率,取0.47; \mathbf{u} 为流体速度矢量; ρ_f 为流体密度,取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ∇p 为压力梯度; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量; \mathbf{g} 为重力加速度,取 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; \mathbf{f}_{int} 为单元体内颗粒和流体间的作用力向量。

2.2.2 流体的作用力方程

在稳定不分叉流体中,若流体与颗粒间的相互作用力仅来自于压力梯度,则任意方向单个颗粒所受流体作用力 $f_{d_{ij}}$ 的表达式为

$$f_{d_{ij}} = -\frac{\nabla p_j}{1-n} \frac{\pi}{6} d_{pi}^3 \quad (3)$$

式中: ∇p_j 为 j 方向上的压力梯度, $j=x, y, z$; d_{pi} ($i=1, 2, \dots, n_p, n_p$ 为颗粒总数)为颗粒直径。

2.2.3 压力梯度方程

对于雷诺数在1~10的层流,其压力梯度为

$$\nabla p_j = \frac{dp}{dx} = -\frac{\rho_f g}{K} u_{x0} \equiv -\frac{v_f \rho_f}{k} u_{x0} \quad (4)$$

式中: v_f 为流体黏滞系数; u_{x0} 为渗流速度; K 为水力传导率; k 为渗透率。

而当雷诺数较大时,可借助 Ergun 方程^[20]来确定压力梯度,即

$$\nabla p_j = 150 \frac{(1-n)^2}{n^2 \bar{d}_p^2} v_f \rho_f + 1.75 \frac{1-n}{n \bar{d}_p} \cdot \rho_f |\bar{v}_j - u_j| (\bar{v}_j - u_j) \quad (5)$$

式中: \bar{v}_j 为颗粒平均速度; u_j 为流体实际平均流速, \bar{d}_p 为颗粒平均直径。

2.3 边坡降雨冲刷模拟过程

水-土相互作用是一个复杂的非线性力学过程,渗流使土体变形,变形的土体又反作用于渗流场。颗粒流计算程序借助水-土耦合原理对水的作用进行考虑,通过在 x, y, z 方向划分固定的流体单元网格,在流体网格单元内的渗透力以体力的形式作用于土颗粒之上,而颗粒的运动又反过来影响流体的运动行为。借助非饱和土体渗流分析(SEEP/W)软件对降雨过程中坡体内水头的分布及变化进行计

算,并基于此计算结果^[21]对模拟过程中颗粒流模型中的水头分布进行调整。

3 边坡冲刷破坏的颗粒流模拟结果

3.1 边坡冲刷破坏形态

由图5可知:图5(a)对应于冲刷破坏过程中的溅蚀、片蚀阶段,表层土体结构发生破坏,颗粒被剥蚀并沿坡面向下滑落;图5(b)对应于坡面侵蚀过程中的细沟侵蚀阶段,抗侵蚀能力较弱的部位已出现细沟侵蚀,同时由于径流在坡脚处的汇集导致坡脚处颗粒流失严重;此后细沟充分发育,沟槽上下贯通,见图5(c);进入切沟侵蚀阶段之后,水流的侵蚀能力越来越强,坡面侵蚀更加强烈,颗粒大量流失,破坏严重,见图5(d)、(e);最终由于坡面土颗粒黏结强度基本丧失,在径流与重力的双重作用下,边坡整体破坏。

3.2 边坡不同部位孔隙率变化过程

孔隙率变化可以表征坡体不同位置遭受侵蚀的程度,利用测量球对坡顶、坡体中部和坡脚的孔隙率进行监测。自坡面向内测量球心距坡面分别为0.062、0.102和0.142 m,球心位于 $y=0.24 \text{ m}$ 剖面,测量球半径均为0.04 m,见图6,①~⑨为测量球编号。

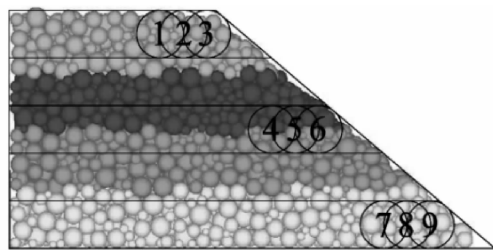


图6 孔隙率监测系统示意

Fig. 6 Sketch of monitor system for void ratio

冲刷过程中边坡不同部位孔隙率的变化情况如下页图7所示。可以看出,由于溅蚀、片蚀的作用,坡面颗粒被剥蚀,而导致受剥蚀部位孔隙率增加,如图7中的3#、6#和9#测量球;细沟的形成及发展阶段,坡顶、坡体中部及坡脚位置3#、6#和9#测量球孔隙率在持续增加,同时沟底的下切侵蚀作用也使得较深处的2#、5#和8#测量球内孔隙率开始增加;进入切沟侵蚀阶段后,由于冲沟的深切作用及水流对沟底土颗粒进一步的淘蚀,1#、4#和7#测量球内的颗粒开始流失,其孔隙率也开始增加。综合比较还可发现,随着冲刷的进行,颗粒的流失从坡顶到坡脚呈增加趋势,这也说明从坡顶到坡脚的侵蚀程度逐渐增强。

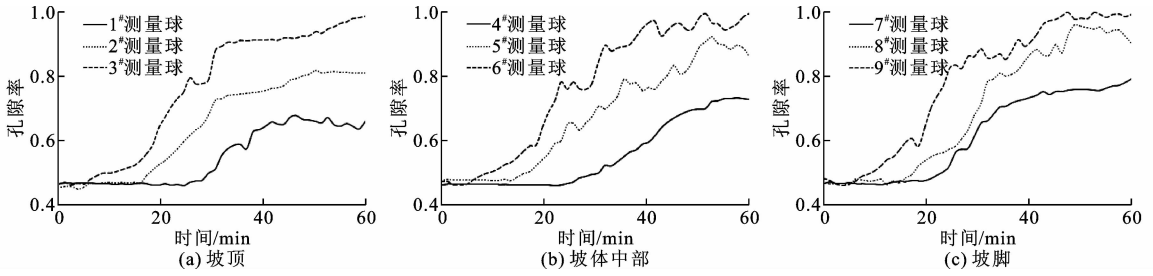


图7 边坡不同部位孔隙率变化曲线

Fig. 7 Curves of void ratio at different positions in slope

3.3 冲刷过程中的水-土相互作用

3.3.1 水流流速

流速对冲刷破坏的研究有重要意义,由式(3)~式(5)可知:流速越大则水力梯度越大,作用在土颗粒上的渗透力也就越大。在数值计算过程中,利用fish函数对坡顶、坡体中部和坡脚处流体单元内的水流流速进行监测,结果如图8、图9所示。总体来看,在冲刷破坏过程中从坡顶到坡脚水流速度呈增大趋势,这也预示着从坡顶向坡脚水流侵蚀能力逐渐增强的规律。

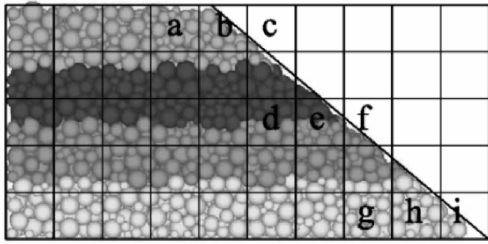


图8 流速监测系统示意

Fig. 8 Sketch of monitor system for water flow rate

a、b、c为坡顶的3个流体单元流速,见图9(a),可以发现,单元内水流流速随时间增加而增加,离坡面越近则单元内水流流速越大,这是由于越靠近坡面,水-土相互作用就越强烈,颗粒流失严重,孔隙率增加更为明显,从而导致流速的增加。此外在曲线上可以明显观察到一些局部峰值的出现,由于在冲刷破坏过程中水土是一同运动的,土颗粒快速运动

引起水流的快速流动,所以曲线上的局部流速峰值可以认为是颗粒明显滑动所导致。尽管a、b、c单元内水流流速足够维持颗粒运动,但由于单元内抗侵蚀能力弱的颗粒逐渐被水流带走,加之其位于坡顶,颗粒流失之后其他颗粒的补充较少,这就导致此处流速不断增大,侵蚀剧烈。

d、e、f为位于坡体中部的3个流体单元流速,见图9(b)。e、f为坡面流体单元,这决定了其水-土相互作用要强于d单元。e、f单元内颗粒在2 min便已经启动,流速曲线出现峰值,由于流体运动的连续性,d单元内水流流速也出现一个小峰值,但稍有滞后。因为维持颗粒运动所需要的水流速度要小于其启动所需的流速,单元内流速在峰值之后有所下降,直到21 min时e、f单元内流速再次发生振荡,出现局部峰值,说明此时在坡体中部发生了颗粒滑动。随着冲刷的进行,d单元内颗粒也开始启动,此后的冲刷过程中,坡体中部又陆续发生几次颗粒滑动。

g、h、i为坡脚处的3个流体单元流速,见图9(c),可以发现,在1 min左右时坡脚处颗粒开始启动,并逐渐流失,在30 min时坡脚发生了第1次滑动。随着坡脚处的水流不断聚集,侵蚀不断加剧,之后的30~60 min坡脚处3个单元内流速曲线均出现了多个峰值,说明此过程中坡脚发生了几次不同规模的颗粒滑动。

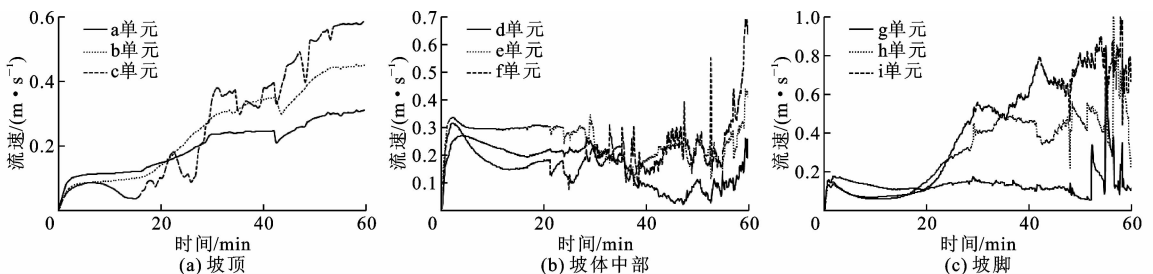


图9 边坡不同部位流体单元流速曲线

Fig. 9 Curves of water flow rate of fluid cells at different positions of slope

3.3.2 颗粒运动速度

图10为对应于图9中各流体单元颗粒的平均运动速度。可以发现:各流体单元内颗粒运动速度与水流流速的变化特征相似,即流速增大则颗粒运

动速度随之增大,流速减小则颗粒运动速度随之减小;越靠近坡面,水-土相互作用越强烈,水流对土体颗粒的侵蚀作用越明显,颗粒运动速度越大;从坡顶到坡脚颗粒运动速度呈增大趋势,遭受侵蚀严重。

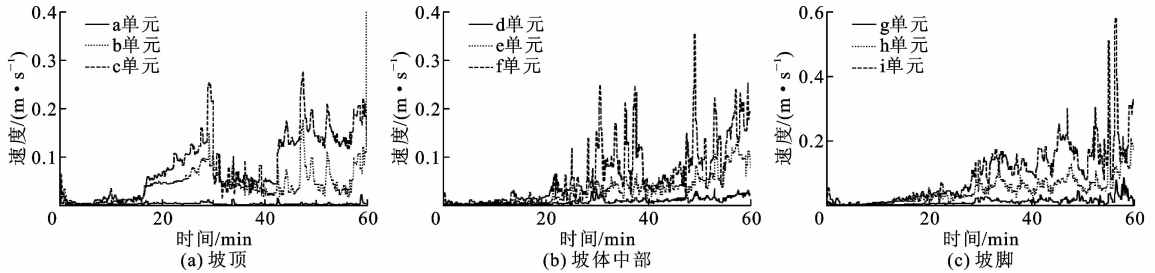


图10 边坡不同部位流体单元内颗粒平均运动速度曲线

Fig. 10 Curves of particle moving rate in fluid cells at different positions in slope

4 结语

(1)试验初期雨水的入渗基本平行于坡面,雨水的浸润范围不断向坡体内扩展,随着降雨的持续,边坡上部土体中的雨水在重力作用下不断向坡脚处汇集,导致坡脚浸润范围相对于其他部位更大,基于神经网络的含水量分析也印证了这一点。

(2)根据室内模型试验可将边坡冲刷破坏的演变过程总结为溅蚀、片蚀→细沟冲蚀→切沟侵蚀→坍塌,坡体坍塌破坏过程从力学机制上基本可归为牵引式破坏。

(3)结合雨水入渗特征和坡面水流侵蚀特征来看,入渗和冲刷破坏二者是相互促进的关系。坡脚处水流流速最快,加之坡体中水流不断向坡脚处汇集,土体软化,导致坡脚处侵蚀进一步加剧,使其成为边坡侵蚀最为严重的部位。

(4)颗粒流计算程序在模拟边坡冲刷破坏大变形的同时,得到了室内模型试验难以获取的信息,如坡体不同部位孔隙率、流体单元内水流流速、颗粒运动速度的分布及变化规律等,这些信息反映了水流的侵蚀能力和边坡侵蚀破坏强度的分布情况,即随着降雨冲刷的进行,水流的侵蚀能力从坡顶到坡脚呈递增趋势,边坡侵蚀强度从坡顶到坡脚逐渐增强。

(5)本文的研究成果可为工程设计和防灾措施的选取提供依据,然而本文中并未考虑植被防护、设置排水措施和加固后边坡的冲刷破坏情况,下一步将从这几个方面入手开展研究工作。

参考文献:

References:

- [1] JORDÁN-LÓPEZ A, MARTÍNEZ-ZAVALA L, BELLINFANTE N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(2): 937-944.
 - [2] WIRTZ S, SEEGER M, RIES J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. *Catena*, 2012, 91: 21-34.
 - [3] FOLTZ R B, COPELAND N S, ELLIOT W J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2542-2550.
 - [4] AUERSWALD K, FIENER P, DIKAU R. Rates of sheet and rill erosion in Germany—A meta-analysis [J]. *Geomorphology*, 2009, 111(3): 182-193.
 - [5] SHEN H, ZHENG F, WEN L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 429-436.
 - [6] LIU Y J, HU J M, WANG T W, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on hillslope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2016, 136: 108-117.
 - [7] 颜可珍, 廖华容. 基于突变理论的路基边坡冲刷稳定性评价[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2011, 31(2): 29-32, 41.
- YAN Ke-zhen, LIAO Hua-rong. Assessment of scouring stability on subgrade slope based on catas-

- trophe theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 29-32, 41.
- [8] 姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区域坡面土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 1-9.
JIANG Yi-liang, ZHENG Fen-liang, WEN Lei-lei, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil in typical black soil regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 1-9.
- [9] ANGULO-MARTINEZ M, BEGUERÍA S, NAVAS A, et al. Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain[J]. Geomorphology, 2012, 175: 38-44.
- [10] MAHMOODABADI M, SAJJADI S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. Geomorphology, 2016, 253: 159-167.
- [11] 卢浩, 晏长根, 杨晓华, 等. 麦秸秆加筋黄土的抗侵蚀性试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(1): 24-32.
LU Hao, YAN Chang-gen, YANG Xiao-hua, et al. Experiment on anti-eroding property of reinforced loess with wheat straw[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(1): 24-32.
- [12] 裴向军, 杨晴雯, 许强, 等. 改性钠羧甲基纤维素胶结固化土质边坡机制与抗冲蚀特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2316-2327.
PEI Xiang-jun, YANG Qing-wen, XU Qiang, et al. Research on glue reinforcement mechanism and scouring resistant properties of soil slope by modified carboxymethyl cellulose[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2316-2327.
- [13] WU Y, LAN H, GAO X, et al. A simplified physically based coupled rainfall threshold model for triggering landslides[J]. Engineering Geology, 2015, 195: 63-69.
- [14] DOU H, HAN T, GONG X, et al. Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 1-13.
- [15] 沈水进, 孙红月, 尚岳全, 等. 降雨作用下路堤边坡的冲刷-渗透耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2456-2462.
SHEN Shui-jin, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Scouring-penetration coupling analysis of embankment slope under rainfall action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2456-2462.
- [16] 周波, 王常明, 匡少华, 等. 辽宁阜朝高速公路路基黄土的工程地质性质[J]. 世界地质, 2009, 28(1): 120-126.
ZHOU Bo, WANG Chang-ming, KUANG Shao-hua, et al. Engineering geological properties of road-bed loess in Fuxin-Chaoyang Highway of Liaoning[J]. Global Geology, 2009, 28(1): 120-126.
- [17] 王常明, 马栋和, 林容, 等. 辽西地区黄土的强度与本构特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(5): 1104-1109.
WANG Chang-ming, MA Dong-he, Lin Rong, et al. Shear strength and constitutive characteristics of loess in west Liaoning[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(5): 1104-1109.
- [18] 王常明, 林容, 陈多才, 等. 辽西黄土湿陷变形特性及湿陷后微观结构变化[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 471-477.
WANG Chang-ming, LIN Rong, CHEN Duo-cai, et al. Collapsible deformation characteristics and its changes in microstructure of loess in west of Liaoning[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 471-477.
- [19] 吴谦, 王常明, 王天佐, 等. 路基边坡降雨试验及基于神经网络的水分场研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(7): 1237-1244.
WU Qian, WANG Chang-ming, WANG Tian-zuo, et al. Rainfall infiltration test on subgrade slope and study on moisture migration by neural network[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(7): 1237-1244.
- [20] 乔昌凯, 刘兴年, 陈兴伟, 等. 卵石透水河床渗流阻力研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(增2): 36-40.
QIAO Chang-kai, LIU Xing-nian, CHEN Xing-wei, et al. Experimental study on the friction factor of permeable gravel bed[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(S2): 36-40.
- [21] 马栋和. 黄土公路边坡坡面冲刷的水-土力学耦合机制及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
MA Dong-he. A study of water-soil mechanics coupling mechanism and model for loess slope surface erosion on highway[D]. Changchun: Jilin University, 2012.