

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.019

基于不同坡比的黄土边坡大雨降雨入渗测试与比较

关晓迪¹, 李荣建¹, 潘俊义², 孙萍³, 姚夷凡¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710018;

3. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 降雨是诱发黄土边坡失稳破坏的重要因素, 加之黄土边坡形态各有其独特性, 因此研究不同坡比条件下黄土边坡降雨入渗规律和机理是必要的。本文以甘肃某均质黄土边坡为原型, 开展了3种坡比(坡比1:1、1:0.75、1:0.5)条件下的大雨降雨边坡模型试验, 测试了边坡土体含水率、基质吸力和湿润锋的变化, 分析了不同坡比条件下降雨入渗过程和坡面冲刷现象, 评价了不同坡比条件下降雨入渗规律的差异。试验结果表明: 在边坡降雨入渗过程中, 坡顶降雨入渗速率最快、坡脚较快、坡中最慢, 且降雨入渗深度呈现出坡脚最深、坡顶较深、坡中最浅的特点; 同时不同坡比条件下黄土边坡降雨入渗规律差异较大, 以坡比1:1边坡的体积含水率峰值作为参照条件, 坡比1:0.75、1:0.5边坡在坡脚处含水率峰值分别增大7.3%、12.7%, 坡中处含水率峰值分别减小0.8%、5.8%, 且坡比越大的边坡, 坡脚处含水率曲线越陡, 坡中处含水率曲线越缓, 表明随着坡比的增大, 坡中降雨入渗速率越慢, 坡脚入渗速率越快, 且以坡比1:1边坡坡中湿润锋深度作为参照条件下, 坡比1:0.75湿润锋深度减小5~10 cm, 坡比1:0.5湿润锋深度减小10~15 cm, 说明坡比越大, 坡中降雨入渗深度越浅; 同时以坡比1:1边坡坡面产流作为参照条件下, 坡比1:0.75、1:0.5边坡的坡面产流分别增大11.1%、27.7%, 表明随着坡比的增大, 坡面径流现象越明显, 冲刷作用越剧烈, 坡脚淤泥层越厚。最后基于Geo-studio软件验证了模型试验结果的正确性。

关键词: 黄土边坡; 模型比尺; 不同坡比; 入渗规律; 渗流分析

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2021)02-0286-09

Testing and comparison of heavy rainfall infiltration of loess slope at different slope ratios

GUAN Xiaodi¹, LI Rongjian¹, PAN Junyi², SUN Ping³, YAO Yifan¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Changqing Technology & Engineering Co., Ltd, Xi'an 710018, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Rainfall is an important factor inducing the instability and failure of loess slope. In addition, the shape of loess slope has its own uniqueness. Therefore, it is necessary to study the law and mechanism for rainfall infiltration of loess slope at different slope ratios. In this paper, heavy rain rainfall slope model tests were carried out at three slope ratios (slope ratio 1:1, 1:0.75 and 1:0.5) based on a homogeneous loess slope in Gansu Province, with the changes of soil moisture content, matric suction and wetting front of the slope tested. Then, the rainfall infiltration process and slope scour phenomena at different slope ratios were analyzed, with the differences of infiltration laws evaluated. The results show that the rainfall infiltration rate is the fastest at the top, the faster at the foot and the slowest in the slope, and that the depth of rainfall

收稿日期: 2020-09-22; 网络出版日期: 2020-12-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201214.1549.012.html>

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2020ZDLGY07-03); 中国地质调查项目(DD20190268)

第一作者: 关晓迪, 男, 硕士生, 研究方向为土力学及边坡工程。E-mail: 2837867139@qq.com

通信作者: 李荣建, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为黄土力学、岩土工程抗震与边坡工程等。E-mail: lirongjian@xaut.edu.cn

infiltration is the deepest, the second at the top and the shallowest in the slope. At the same time, the rainfall infiltration laws of loess slope are greatly different at different slope ratios. Taking the peak volume moisture content of a slope with a slope ratio of 1 : 1 as a reference condition, the peak value of the water content at the foot of the slope at a slope ratio of 1 : 0.75 and 1 : 0.5 increased by 7.3% and 12.7% respectively, and the peak value of the water content in the slope decreased by 0.8% and 5.8% respectively. In addition, the steeper the moisture content curves at the foot of a slope, the slower the moisture content curves in the slope with a larger slope ratio, indicating that with the increase of slope ratio, the slower the rainfall infiltration rate in the slope, the faster the infiltration rate at the foot of the slope. Taking the wetting front depth in a slope at a slope ratio of 1 : 1 as a reference condition, the wetting front depth at a slope ratio of 1 : 0.75 was reduced by 5~10 cm, and the wetting front depth in a slope ratio of 1 : 0.5 was reduced by 10~15 cm. It shows that the higher the slope ratio is, the shallower the rainfall infiltration depth is. At the same time, under the reference condition of slope surface yield flow at the slope ratio 1 : 1, the slope surface yield flow at the slope ratio 1 : 0.75 and 1 : 0.5 increases by 11.1% and 27.7% respectively. It shows that with the increase of slope ratio, the runoff on the slope surface is more obvious, and the slope scour becomes more serious and the silt layer of the slope foot is thicker. Finally, it verified the correctness of model test results based on the Geo-studio software.

Key words: loess slope; model scale; different slope ratios; infiltration laws; seepage analysis

黄土,一种第四纪沉积物,广泛分布于美国、俄罗斯、新西兰和中国等地区^[1-3],约占世界面积的2.5%^[4]。其中,中国黄土主要分布于西北地区,面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$,具有沉积最广、地层最全、厚度最大的特征^[5-6],加之黄土特殊的结构性和水敏性,降雨是黄土边坡失稳变形和破坏的主要诱因之一^[7-9]。

在现场试验研究方面,胡明鉴等^[10]开展了人工降雨的滑坡泥石流现场试验,初步揭示了蒋家沟地区暴雨-滑坡-泥石流的共生关系。武红娟等^[11]针对不同坡比的公路路堑边坡开展了现场模拟降雨的边坡冲刷试验,研究了黄土边坡抗冲刷的最优坡比问题。简文星等^[12]在黄土滑坡1#崩塌体上进行了双环渗透试验与降雨现场监测,获取了改进的入渗模型参数。王磊等^[13]开展了人工模拟降雨现场试验,通过隔离边界设置真实再现了人工降雨时雨水入渗对边坡开裂的影响过程。

然而,现场试验成本高、难操作,试验结果常常差强人意,而模型试验不受外界和自然条件的限制,试验结果精准,且节省人力、资金和时间,因此被广泛应用于各种土工问题中^[14]。李焕强等^[15]通过粉砂边坡模型,采用自动水分传感器测定含水率,用光纤传感器测定应变,研究了降雨入渗作用下边坡性状的变化规律。钱纪芸等^[16]通过粉质黏土边坡降雨的离心模型试验,分析了边坡位移对降雨入渗的响应规律。詹良通等^[17]通过离心机模拟了不同雨强下非饱和粉土边坡的失稳过程,得到了雨强与边坡失稳的时间关系曲线。江强强等^[18]开展了降雨和库水位联合作用下库区岩土质边坡模型试验研究,揭示了三峡库区滑坡的演化规律及孕灾机制。

上述模型、试验研究成果有效推动了边坡降雨入渗研究的发展,但还缺乏不同坡比条件下针对均质黄土边坡降雨入渗规律的系统研究。因此,本文以甘肃庆阳地区高4 m的黄土边坡为原型,根据相似原理,建立室内黄土边坡模型,模拟大雨条件下3种坡比的边坡降雨入渗,对比分析不同坡比的入渗特征及坡面冲刷规律。研究结果可为西北地区自然黄土边坡的防护和降雨型滑坡的治理提供一些建设性意见。

1 模型边坡降雨入渗试验

1.1 试验相似比尺

本试验原型边坡坡高4 m,宽2.5 m,考虑到室内场地的限制,将原型与模型边坡的几何相似比设定为 $C_l = 4$,并在设计渗透模型试验时抓住主要因素,使原型与模型土的渗透系数相似比严格满足 $C_k = 2$,略微放松次要因素,使干密度的相似比近似满足 $C_\rho = 1$,以降低模型边坡的制样难度。由此,采用量纲分析理论和相似准则,推导出原型与模型的降雨相关各物理量的相似关系,如表1所示,原型与模型黄土的物性指标如表2所示。

表1 降雨相关各物理量的相似比尺

Tab. 1 Similar scale of physical quantities related to rainfall

物理量	量纲	原型	模型
长度	L	N	1
渗透系数	L/T	$N^{1/2}$	1
渗流速度	L/T	$N^{1/2}$	1
降雨历时	T	$N^{1/2}$	1
降雨强度	L/T	$N^{1/2}$	1

表 2 原型和模型黄土物性指标

Tab. 2 Loess physical properties of prototype and model

研究对象	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	比重 d_s	初始质量含水率 $\omega_0 / \%$	渗透系数 $k / (cm \cdot s^{-1})$
原型	1.55	2.72	8.00	2.1×10^{-6}
模型	1.63	2.72	8.00	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-6}$

1.2 试验装置

试验设备由边坡模型箱、降雨系统和监测系统组成。降雨系统主要包括一体式实心锥形喷头、PPR 降雨管路和降雨支架等,锥形喷头可通过旋转喷嘴来调整喷洒效果,降雨均匀度达 85% 以上。监测系统对含水率、基质吸力、湿润锋及坡面冲刷进行监测。模型试验原理如图 1 所示。

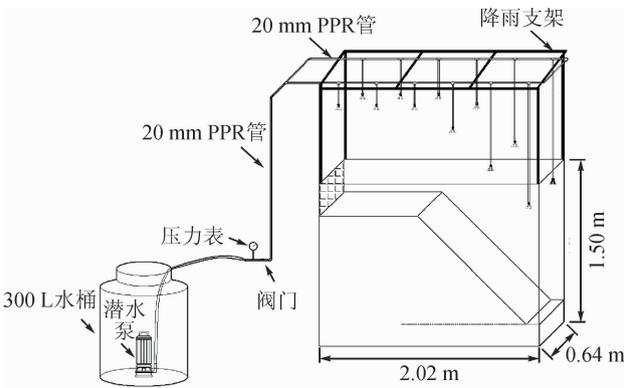


图 1 模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model test

1.3 试验方案

本试验基于 3 种坡比(坡比 1 : 1、1 : 0.75 和 1 : 0.5)的边坡,开展了大雨条件下持续降雨 24 h 的模型边坡降雨试验,其中降雨强度为 10.75 mm/d。不同坡比的边坡传感器埋深如图 2 所示,在边坡不同位置和深度布置了 10 个水分传感器、3 个张力计, W_n 表示水分传感器, S_n 表示张力计。

2 试验结果与分析

2.1 不同坡比对体积含水率的影响分析

图 3 为边坡降雨过程中不同坡比的体积含水率时程曲线。由图可知:降雨过程中测点 W_3 含水率均未发生变化,说明坡面入渗深度小于 75 cm;距坡面同为 5 cm 深度的坡顶测点 W_8 、坡脚测点 W_9 、坡中测点 W_{11} 处含水率增长速率递减,说明坡顶降雨入渗速率最快、坡脚较快、坡中最慢,且测点 W_{11} 、 W_8 、 W_9 处含水率峰值依次递增,说明坡脚入渗最深、坡顶较深、坡中最浅^[19];降雨 24 h 后,测点 W_{11} 、

W_8 、 W_9 处含水率曲线变化平缓,略微呈现负增长,这是由于降雨结束后蒸发作用使含水率减小;距坡顶不同深度处的测点 W_4 含水率先开始增长,然后是测点 W_7 、最后是 W_8 ,且相应的含水率增长速率递增,说明雨水的入渗能力随着降雨入渗深度的增加而减弱。

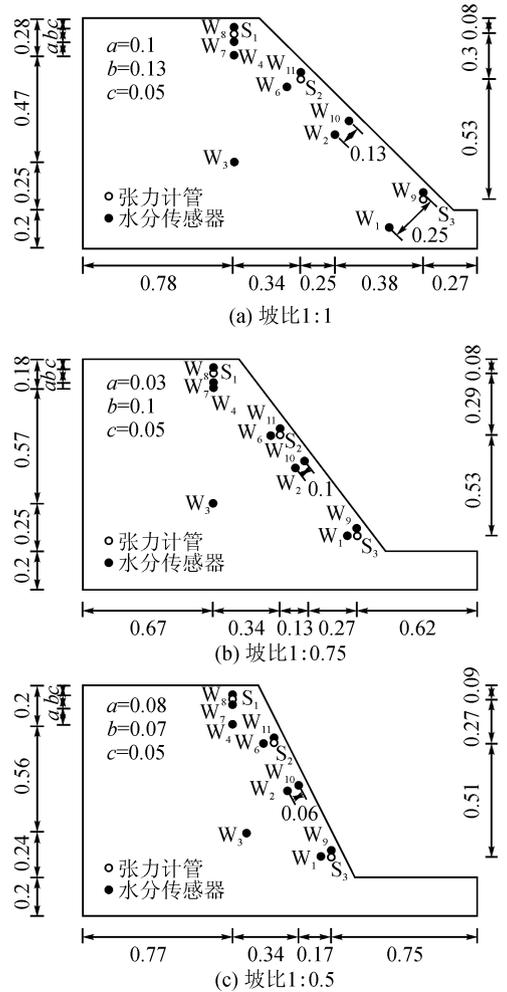


图 2 传感器埋设图(单位:m)

Fig. 2 Sensor embedding diagram(unit:m)

不同坡比的边坡在同一测点 W_9 或 W_{11} 处其含水率的突变速率和峰值不同,其中坡比 1 : 1 的边坡在 W_9 处含水率峰值为 27.5%、 W_{11} 处含水率峰值为 25.7%;坡比 1 : 0.75 的边坡在 W_9 处含水率峰值为 29.5%、 W_{11} 处含水率峰值为 25.5%;坡比 1 : 0.5 的边坡在 W_9 处含水率峰值为 31%、 W_{11} 处含水率峰值为 24.2%。本文以坡比 1 : 1 边坡作为参照条件,定义了 W_9 和 W_{11} 处含水率峰值的相对变化率(式(1)),得到了坡比 1 : 0.75、1 : 0.5 条件下, W_9 处含水率分别增大了 7.3%、12.7%, W_{11} 处含水率分别减小了 0.8%、5.8%,且坡比越大的边坡, W_9 处含水率曲线越陡, W_{11} 处含水率曲线越缓,呈现出

坡比越大,坡脚含水率突变速率越快且峰值越高,坡中突变速率越慢且峰值越低的特点,表明坡比越大,坡脚降雨入渗速率越大,坡中入渗速率越小。这是由于坡脚以零度角平面接受雨水,坡中则存在一定角度,而角度无形中削弱了雨强。同时,不同坡比的边坡降雨入渗深度不同,坡比1:1的边坡坡顶降雨入渗深度28~75 cm,坡中18~75 cm,坡脚30~75 cm;坡比1:0.75的边坡坡顶入渗深度20~75 cm,坡中15~30 cm,坡脚15~75 cm;坡比1:0.5的边坡坡顶入渗深度20~75 cm,坡中11~30 cm,坡脚11~75 cm。说明降雨入渗深度呈现出坡脚最深、坡顶较深、坡中最浅的特点,且坡比越大,坡中降雨入渗深度越浅,这是由于随着降雨的持续,坡面表层土体入渗能力降低,当降雨强度大于土体入渗能力时,坡面开始产生径流,且坡比越大的边坡径流现象越明显,坡中降雨入渗程度越差。

$$n_0 = (\theta_a - \theta_0) / \theta_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: n_0 为含水率峰值的相对变化率; θ_a 为坡比1:0.75(或1:0.5)边坡的体积含水率,%; θ_0 为坡比1:1边坡的体积含水率,%。

2.2 不同坡比对基质吸力的影响分析

图4为不同坡比的边坡在测点 S_1 、 S_2 、 S_3 处的基质吸力时程曲线。由图可知:降雨过程中,不同坡比的边坡坡顶处基质吸力变化情况基本相同,基质吸力值稳定在21 kPa附近;持续降雨5~6 h,坡顶、坡中及坡脚的基质吸力均开始减小,持续降雨6~12 h,坡顶、坡中及坡脚的基质吸力变化均较为明显,且坡比1:1边坡的坡中基质吸力曲线最陡,坡比1:0.75和1:0.5的坡中基质吸力曲线依次变缓,说明坡比1:1边坡的坡中基质吸力减小速率最快,坡比1:0.75次之、坡比1:0.5最慢;同时,坡比1:0.5边坡的坡脚基质吸力减小速率最快,坡比1:0.75次之,坡比1:1最慢,表明坡比越大,坡脚降雨入渗速率越快,坡中入渗速率越慢;降雨至12 h左右,坡比1:1边坡的坡中基质吸力最先达到稳定值,坡比1:0.75次之,坡比1:0.5最慢,且坡中处的基质吸力稳定值分别为23 kPa、26.3 kPa、27.8 kPa。本文以坡比1:1边坡作为参照条件,定义了坡中处基质吸力稳定值的相对变化率(式(2)),得到了坡比1:0.75、1:0.5条件下,坡中基质吸力稳定值分别增大了14.3%、20.9%,说明坡比越小,坡中基质吸力稳定值越小,降雨入渗越充分。随着降雨的持续,坡中基质吸力虽略有起伏,但总体趋势较为平稳。

$$n_j = (j_a - j_0) / j_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: n_j 为基质吸力稳定值的相对变化率; j_a 为坡比

1:0.75(或1:0.5)边坡的基质吸力稳定值,kPa; j_0 为坡比1:1边坡的基质吸力稳定值,kPa。

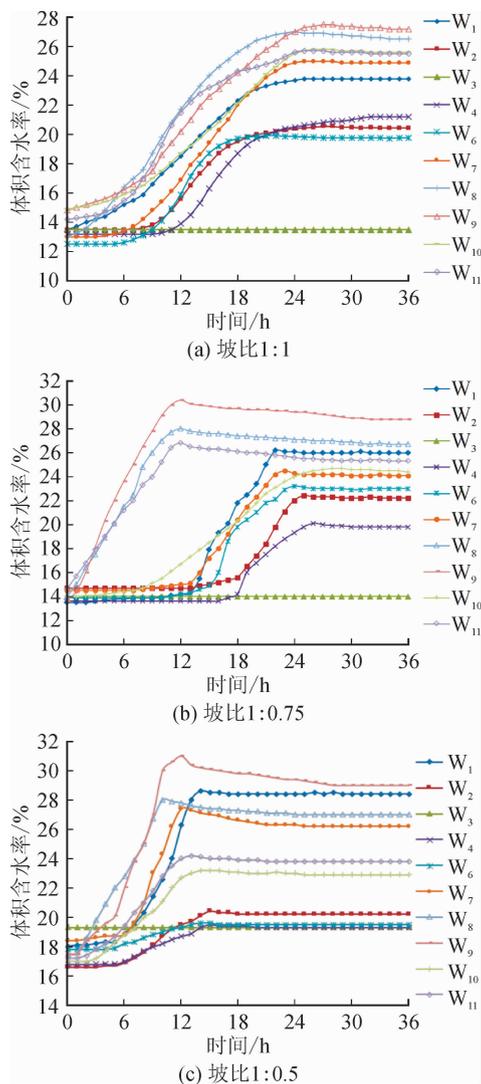


图3 不同坡比含水率的时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of moisture content at different slope ratios

2.3 不同坡比对湿润锋的影响分析

图5为持续降雨24 h后不同坡比边坡的湿润锋。由图可看出:不同坡比的边坡在坡中位置处湿润锋深度差异明显,坡比1:1边坡坡中湿润锋深度范围为20~25 cm、坡比1:0.75边坡坡中湿润锋深度范围为15~20 cm、坡比1:0.5边坡坡中湿润锋深度范围为10~15 cm,以坡比1:1边坡的坡中湿润锋深度作为参照条件,坡比1:0.75湿润锋深度减小5~10 cm,坡比1:0.5湿润锋深度减小10~15 cm,说明坡比越大,坡中降雨入渗深度越浅。这是由于随着坡比的增大,边坡坡中处接受雨水的能力减弱,持续降雨至坡面开始产生径流时,坡比越大,坡面径流越明显,坡中入渗程度越差,入渗深度越浅。

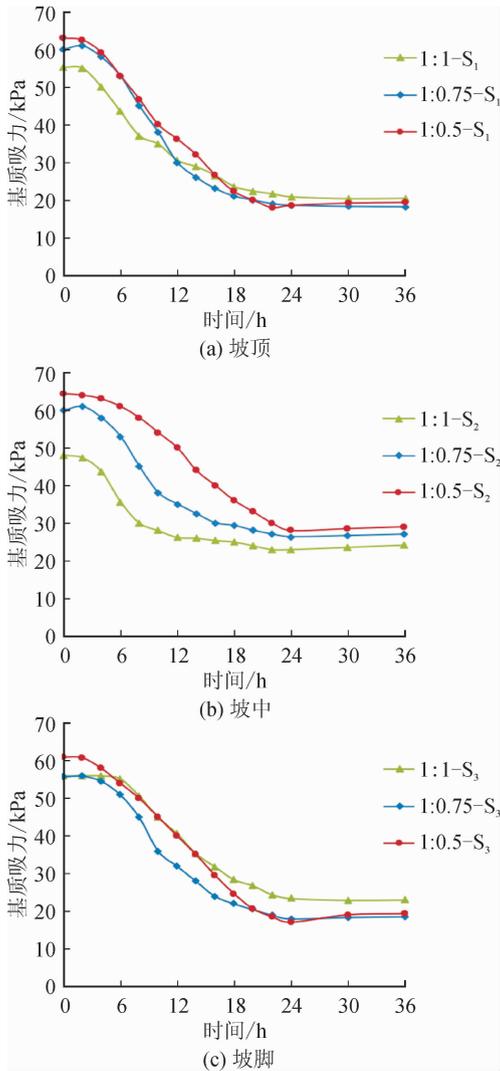


图 4 不同坡比基质吸力的时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of matric suction at different slope ratios

2.4 不同坡比对边坡冲刷的影响分析

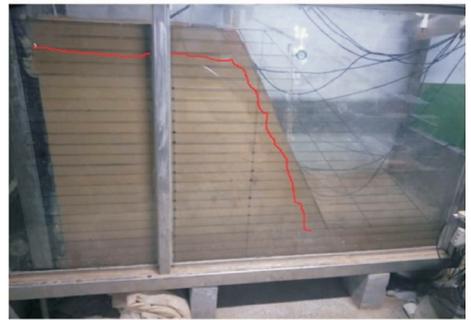
图 6 为不同坡比边坡的坡面冲刷效果图。由图可看出：在降雨过程中，坡比 1 : 1 的边坡坡面表层土体剥落，降雨至 15 h 左右，坡表土体饱和，坡面处可见沟状径流，本文通过地面产流计算公式(式(3))，得到了坡面产流的径流深约为 3.89 mm，降雨结束后坡肩形成一道宽约 2 cm、长约 35 cm 的冲蚀沟；降雨至 14 h 左右，坡比 1 : 0.75 的边坡坡表土体达到饱和，坡面径流现象明显，且坡面产流径流深约为 4.32 mm，表层土体在降雨侵蚀作用下形成了游离态的泥土，雨水携带着泥土呈条状沿坡面往下流，在坡脚堆积成松软淤泥层，坡肩处形成明显的冲蚀沟；坡比 1 : 0.5 的边坡坡面土体剥落最为严重，降雨 12 h 左右，边坡表层土体逐渐饱和，坡面形成了较强的泥流运动，坡面产流径流深约为 4.97 mm，靠近模型箱侧壁的坡面土体出现了多处冲刷



(a) 坡比1:1



(b) 坡比1:0.75



(c) 坡比1:0.5

图 5 不同坡比湿润锋

Fig. 5 Wetting front of the slope at different slope ratios

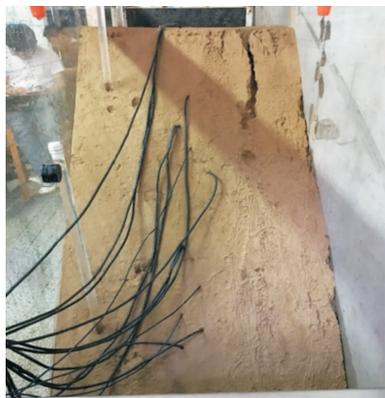
凹坑，坡肩冲蚀沟发育程度最好，坡脚淤泥层加厚。本文以坡比 1 : 1 边坡作为参照条件，定义了坡面产流径流深的相对变化率(式(4))，得到了坡比 1 : 0.75、1 : 0.5 条件下，坡面产流径流深分别增大了 11.1%、27.7%。上述试验结果表明：坡比越大，坡面径流现象越明显，冲刷程度越剧烈，且坡脚堆积的淤泥层越厚。这可能是由于坡比越大，坡面土体的入渗能力越弱，坡面雨水往坡脚流动的趋势越强，坡面遭受雨水侵蚀的程度越严重。

$$R = \frac{3.6 \sum Q \Delta t}{F} \quad (3)$$

式中： R 为径流深，mm； Δt 为计算时段，h； Q 为单位时间的流量值， cm^3/s ； F 为径流面积， m^2 ；3.6 为单位换算系数。

$$n_R = (R_s - R_0) / R_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中: n_R 为坡面产流径流深的相对变化率; R_a 为坡比1:0.75(或1:0.5)边坡的坡面产流,mm; R_0 为坡比1:1边坡的坡面产流,mm。



(a) 坡比1:1



(b) 坡比1:0.75



(c) 坡比1:0.5

图6 不同坡比的坡面冲刷现象

Fig. 6 Slope scour phenomena at different slope ratios

3 边坡降雨的渗流分析

3.1 数值模型建立

采用 Geo-studio 软件建立相应的数值模型来分析边坡降雨入渗规律,数值模型网格划分如图7所示。设置降雨条件为边界条件,以降雨强度的方式作用于边坡上表面,日降雨量为 $2.07 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降雨时长为 24 h。设置模型底面为零压力线。

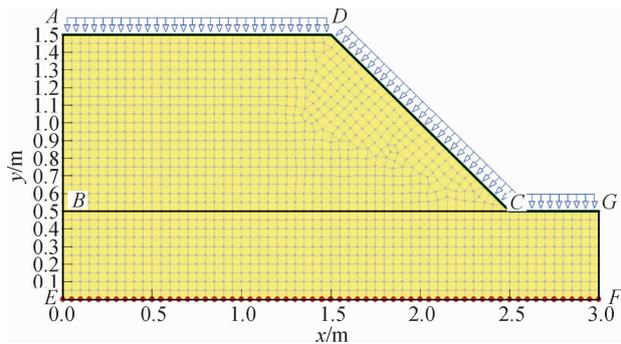


图7 网格划分及边界条件设置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of grid division and boundary condition setting

3.2 数值模型参数

黄土的初始体积含水率为 12.4%,数值模拟中,取 $a=20 \text{ kPa}$, $n=2$, $m=0.5$,运用 V-G 模型,可得黄土的土-水特征曲线,如图8所示。渗透系数与基质吸力的关系如图9所示。

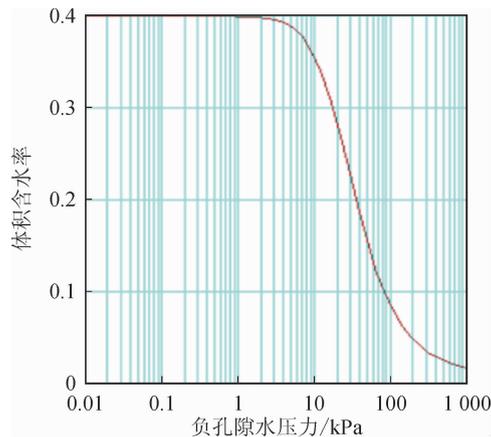


图8 土-水特征曲线

Fig. 8 Soil-water characteristic curve

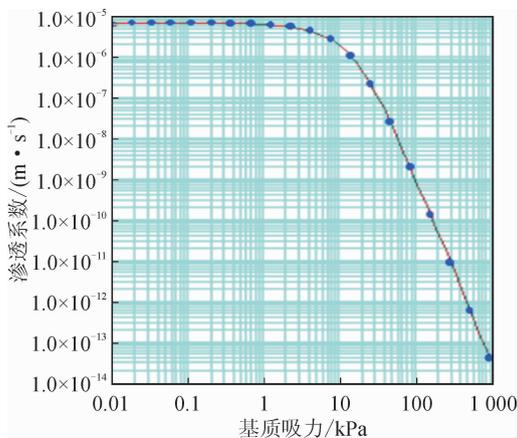


图9 渗透系数与基质吸力关系曲线

Fig. 9 Relationship between permeability coefficient and matric suction

3.3 模拟结果分析

坡比 1 : 1 边坡的初始状态体积含水率分布如图 10 所示。由图可知,各土层的含水率自上而下逐级递增,表层含水率在 12%左右,基层为 13.4%。

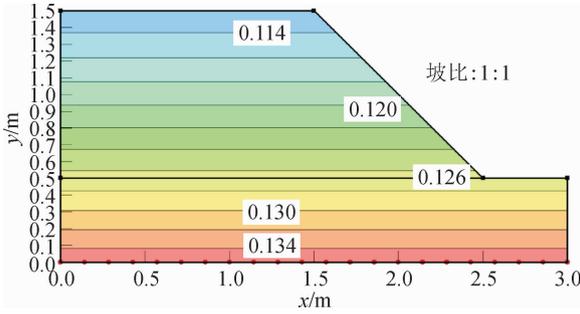


图 10 初始时刻含水率分布图

Fig. 10 Moisture content distribution diagram at initial time

图 11 为降雨 6 h 不同坡比边坡的体积含水率分布图。由图可知:降雨 6 h 时左右,不同坡比边坡的坡面表层含水率等值线均变得密集,坡顶表层含水率相差不大,都在 13%左右,坡比 1 : 1、1 : 0.75 和 1 : 0.5 的边坡坡中表层含水率分别为 13%、12.5%和 12%,同初始状态的 12%相比,坡比 1 : 1 含水率增加 1%,坡比 1 : 0.75 含水率增加 0.5%,可见坡比越大,坡中含水率变化量越小,变化速率越慢,说明坡比越大,坡中降雨入渗速率越慢,入渗深度越浅。坡比 1 : 1、1 : 0.75 和 1 : 0.5 的边坡坡脚表层含水率分别为 14%、14.5%、15%,同初始状态的 12.6%相比,坡比 1 : 1 含水率增加 1.4%,坡比 1 : 0.75 含水率增加 1.9%,坡比 1 : 0.5 含水率增加 2.4%,可见坡比越大,坡脚含水率变化量越大,变化速率越快,说明坡比越大,坡脚降雨入渗速率越快,入渗深度越深。这与室内边坡模型试验的结论一致。

图 12 为数值模拟中不同坡比边坡的坡中测点 W_{10} 的体积含水率时程曲线,图 13 为模型试验中测点 W_{10} 的体积含水率时程曲线。由图可知:降雨开始后,三条曲线均呈现增长趋势,降雨至 6~18 h,坡比 1 : 1 的边坡含水率曲线最陡,坡比 1 : 0.75 较陡、坡比 1 : 0.5 最缓,说明坡比越小,坡中降雨入渗速率越大;降雨 24 h 后,坡比 1 : 1 的曲线峰值最大,坡比 1 : 0.75 次之、坡比 1 : 0.5 最小,含水率分别为 26.7%、25.5%和 21.1%,以坡比 1 : 1 边坡的坡中含水率为参照条件,坡比 1 : 0.75、坡比 1 : 0.5 的坡中含水率分别减小 1.2%和 5.6%,说明坡比越

小,坡中土体含水率越高,降雨入渗越充分,入渗深度越大。

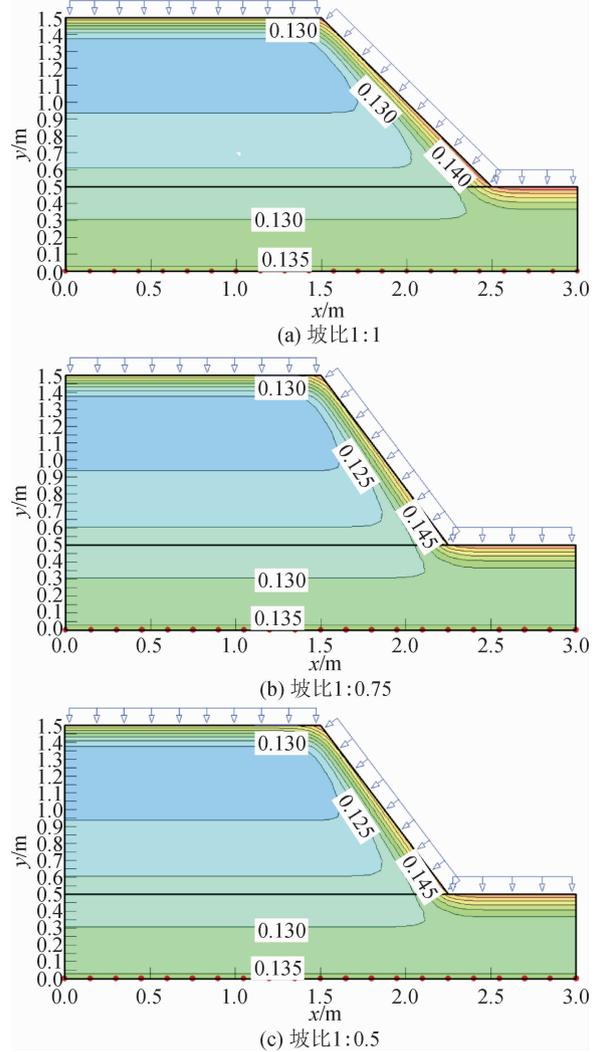


图 11 不同坡比含水率分布图

Fig. 11 Distribution of moisture contents at different slope ratios

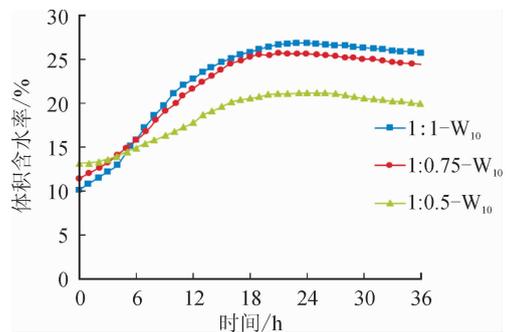


图 12 数值模拟中测点 W_{10} 的含水率时程曲线
Fig. 12 Time-history curves of W_{10} moisture content in numerical simulation

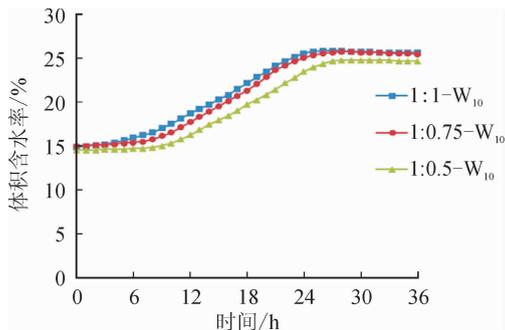


图 13 模型试验中测点 W_{10} 的含水率时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of W_{10} moisture content in the model test

4 结 论

1) 在降雨过程中,同一边坡的坡顶降雨入渗速率最快、坡脚较快,坡中最慢,且降雨入渗深度呈现出坡脚入渗最深、坡顶较深、坡中最浅的特点,随着入渗深度的增加,雨水入渗能力减弱;对于不同坡比的边坡,当降雨持续 6~12 h,随着坡比的增大,坡中处体积含水率、基质吸力的变化速率和峰值均减小,坡脚处含水率、基质吸力的变化速率和峰值均增大,表明坡比越大,坡中入渗速率越慢,坡脚入渗速率越快。

2) 不同坡比边坡的湿润锋深度差异较大,坡比 1:1 边坡的坡中湿润锋深度在 20~25 cm 之间、坡比 1:0.75 边坡的坡中湿润锋深度在 15~20 cm 之间、坡比 1:0.5 边坡的坡中湿润锋深度在 10~15 cm 之间,表明坡比越大,坡中入渗速率越慢,入渗深度越浅。

3) 对于不同坡比的边坡,在降雨入渗过程中,坡比越大,坡面雨水向坡脚流动的趋势越强,坡面降雨侵蚀作用越显著,径流现象越明显,冲刷破坏越严重,降雨结束后,坡肩处冲蚀沟发育越好,坡脚处堆积的淤泥层越厚。

参考文献:

[1] CHANG J M, SONG S W, FENG H P. Analysis of loess slope stability considering cracking and shear failures[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2016, 16(6): 982-989.

[2] LI X A, LI L C. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: an experimental study[J]. Environmental Earth Science, 2017, 76(15): 14.

[3] 张涛. 基于三轴压缩试验的山西原状马兰(Q_3)黄土抗剪强度各向异性的研究[D]. 太原:太原理工大

学, 2018.

ZHANG Tao. Shear strength anisotropy of Shanxi Malan(Q_3) loess based on triaxial compression test[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

- [4] LI D J, ZHAO J T, PANG C Y, et al. Stability analysis of loess slope with hidden hole by numerical methods [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170-173: 306-311.
- [5] 王烁. 泾阳南塬黄土的力学特性与滑坡机制研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- WANG Shuo. Study on mechanical characteristics of loess and mechanism of loess landslide in the south tableland in Jingyang County[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [6] 张奇莹, 徐盼盼, 钱会. 泾阳原状黄土-古土壤序列抗剪强度各向异性及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2365-2376.
- ZHANG Qiyang, XU Panpan, QIAN Hui. Study on shear strength anisotropy of undisturbed loess-paleosol sequence in Jingyang Country[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2365-2376.
- [7] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. Landslides, 2004, 1(3): 211-219.
- [8] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure process in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator [J]. Landslides, 2004, 1(4): 277-288.
- [9] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732-736, 744.
- WU Junjie, WANG Chenghua, LI Guangxin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 732-736, 744.
- [10] 胡明鉴, 汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 824-828.
- HU Mingjian, WANG Ren. Testing study on the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia Valley[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 824-828.
- [11] 武红娟, 徐伟. 不同坡比黄土路堑边坡冲刷试验研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010(10): 85-87.
- [12] 简文星, 许强, 童龙云. 三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3527-3533, 3548.
- JIAN Wenxing, XU Qiang, TONG Longyun. Rainfall infiltration model of Huangtupo landslide in Three

- Gorges Reservoir area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013,34(12): 3527-3533, 3548.
- [13] 王磊, 李荣建, 潘俊义, 等. 隔离边界条件下连续降雨诱发黄土边坡开裂试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(11): 1163-1170.
WANG Lei, LI Rongjian, PAN Junyi, et al. Experimental study on loess slope cracking induced by continuous rainfall under isolated boundary[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2019, 52(11): 1163-1170.
- [14] 方磊, 李广信, 黄锋. 室内土工模型试验的新方法-桩基渗水力土工模型试验[J]. *高等地质学报*, 1997, 3(4): 451-457.
FANG Lei, LI Guangxin, HUANG Feng. A new indoor model test of soil-the hydraulic gradient similitude model test for piled foundation [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3(4): 451-457.
- [15] 李焕强, 孙红月, 孙新民, 等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 589-594.
LI Huanqiang, SUN Hongyue, SUN Xinmin, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 589-594.
- [16] 钱芸芸, 张嘎, 张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 398-402, 416.
QIAN Jiyun, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Centrifuge model test for deformation mechanism of soil slope during rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011,32(2): 398-402, 416.
- [17] 詹良通, 刘小川, 泰培, 等. 降雨诱发粉土边坡失稳的离心模型试验及雨强-历时警戒曲线的验证[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1784-1790.
ZHAN Liangtong, LIU Xiaochuan, TAI Pei, et al. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in silty soils and validation of intensity-duration curves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1784-1790.
- [18] 江强强, 焦玉勇, 宋亮, 等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4361-4370.
JIANG Qiangqiang, JIAO Yuyong, SONG Liang, et al. Experimental study on reservoir landslide under rainfall and water-level fluctuation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4361-4370.
- [19] 霍旭挺. 陇东二元地层边坡降雨入渗试验研究及其入渗规律评价[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
HUO Xuting. Rainfall test and its infiltration rule evaluation of binary stratigraphic slope in Longdong [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

(责任编辑 周 蓓)