

降雨在裂隙型冰水堆积体中的入渗过程

赵石力¹, 涂国祥¹, 郑智明², 丁昊¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 广东华隧建设集团股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: [目的] 探究降雨在裂隙型堆积体中的入渗过程, 研究降雨条件下土坡内体积含水率、基质吸力、孔压等的变化情况及湿润锋迁移规律, 为降雨诱发覆盖层斜坡失稳机理提供理论支持。[方法] 针对两类不同结构堆积体土样进行室内模型试验。[结果] 均质模型中湿润锋均匀下渗, 锋面达测点后引发孔压及体积含水率减小和基质吸力增加; 坡顶受降雨影响变化明显, 而坡底变化具有累积效应; 裂隙构成雨水入渗的优势通道, 其底部会形成暂态饱和区, 湿润锋面在该区域产生强烈下凹形成渗透“漏斗”, 促使湿润锋在该区域先期触底; [结论] 降雨入渗过程为: ①均质型: 完全入渗→入渗放缓→稳定入渗→饱和入渗; ②裂隙发育型: 完全入渗→局部强烈下渗→补偿加速下渗→水平侧渗。

关键词: 降雨入渗; 冰水堆积体; 裂隙; 模型试验; 湿润锋

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0009-07

中图分类号: TU411.93

文献参数: 赵石力, 涂国祥, 郑智明, 等. 降雨在裂隙型冰水堆积体中的入渗过程[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6):9-15. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20181107.001. Zhao Shili, Tu Guoxiang, Zheng Zhiming, et al. Influence of fissures on rainfall infiltration process in outwash congeries[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):9-15.

Influence of Fissures on Rainfall Infiltration Process in Outwash Congeries

ZHAO Shili¹, TU Guoxiang¹, ZHENG Zhiming², DING Hao¹

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. China Tunnel Construction Group Co., Ltd. Guangdong, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the rainfall infiltration process in fractured deposits, this study focuses on the variation of volume moisture content, matric suction, pore pressure and other changes in soil slope under rainfall conditions, as well as the migration law of wetting, which will provide theoretical support for the instability mechanism of rain-induced overburden slope. [Methods] The indoor model tests of two types of different structural soil deposits were carried out. [Results] The wetting fronts in the homogeneous accumulations were uniformly moving downward, the pore pressure and water content decreased and the matric suction increased when the wetting fronts reach the measuring points. The change of top slope were affected obviously by rainfall while the bottom showed a cumulative effect. The fissures constituted the dominant channel for rainwater infiltration and there was a transient saturated zone at the bottom of the fissures. The wetting fronts produced a strong depressions in this area that form a percolation “funnel” that causes the wetting fronts to reach its bottom in advance. [Conclusion] The rainfall infiltration processes are in the sequence of complete infiltration→slow infiltration→stable infiltration→saturated infiltration for homogeneous model and in the sequence of complete infiltration→local strongly infiltration→compensation accelerated infiltration→horizontal lateral infiltration for fracture model.

Keywords: rainfall infiltration; outwash congeries; fissures; model tests; wetting front

收稿日期: 2018-09-08

修回日期: 2018-09-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“降雨在山谷型古冰水堆积体中非线性入渗过程及其对稳定性影响的时间效应”(41472274)

第一作者: 赵石力(1992—), 男(汉族), 四川省夹江县人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程及地质灾害防治。E-mail: 549123318@qq.com。

通讯作者: 涂国祥(1978—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士、教授、硕士生导师, 主要从事堆积体工程地质特性及稳定性方面的研究。E-mail: pyk@cdut.edu.cn。

冰水堆积体广泛分布于我国西南河谷地区,其形成时间较长,是多期次河流作用的产物,具有密度高、天然含水率低、孔隙率低的特点,有多变的沉积特征和复杂的物质组成,在降雨条件下容易诱发滑坡失稳^[1-2],造成人员伤亡和财产损失,因此深入研究降雨在冰水堆积体中的入渗过程,对于滑坡预测预报及灾害防治工作的开展具有重要意义。目前,许多学者针对降雨入渗所做的大量研究和试验表明雨水在土体中的入渗是一个非饱和的过程,但大多数研究集中在浅表层滑坡方面^[3-4],对于降雨诱发深厚层堆积体滑坡的研究还很欠缺。林鸿州等^[5]通过分析降雨诱发土质边坡失稳的模型试验,提出将降雨强度和累积雨量同时作为雨量预警基准。杜婷婷等^[6]针对黄土边坡研究了不同因素组合影响下的边坡土体侵蚀规律和演化机理。部分学者针对裂隙也进行了尝试性探索,如刘博等^[7]对入渗条件下裂隙发育的黄土边坡稳定性的研究,指出了边坡破坏的 4 个阶段。姚海林等^[8]利用线弹性力学理论研究了裂隙性对膨胀土超固结度和强度的影响,并考虑了裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响。张维等^[9]研究了裂隙发育位置及深度对膨胀土边坡渗流及稳定性的影响。陈善雄等^[10]考虑了裂隙面及软弱夹层等因素建立了膨胀土裂隙边坡地质模型,并分析了含裂隙膨胀土边坡的稳定性及其特征。辛明明等^[11]通过对室内降雨蒸发交替作用下膨胀土裂隙开裂过程进行模拟,研究了不同循环粗疏对裂隙的长度、宽度、数量的影响。而这些研究主要着眼于对膨胀土和岩质边坡的分析,对冰水堆积体中裂隙如何影响降雨入渗过程研究甚少。为此,本文以流沙河流域某冰水堆积体为研究对象,通过室内降雨试验,研究堆积体在降雨条件下因裂隙发育导致堆

积体结构不均匀性对降雨入渗过程中土体内湿润锋迁移规律的影响。同时,通过对体积含水率、基质吸力、孔压等数据的观测分析,为今后降雨诱发覆盖层斜坡失稳机理提供理论支持和试验数据。

1 模型试验介绍

1.1 试验装置

室内降雨试验装置主要包括模型箱、降雨模拟系统和数据监测系统。

(1) 模型箱。尺寸为 1.5 m×0.9 m×1.2 m。由刚性框架焊接固定,侧壁为透明有机玻璃,内侧角钢固定,底板为 0.6 cm 厚高强度钢板。模型箱各缝隙处用玻璃胶密封。有机板外壁画有网格线(间距 10 cm),便于堆放土样、填埋仪器和试验现象观察。

(2) 降雨模拟系统。包括雾化喷头,水管线,压力计及流量表。降雨有效面积为 1.35 m²,降雨强度设定范围为 10~30 mm/h,实测为 18.64 mm/h,降雨均匀度根据公式(1)计算得到,实测为 80.08%。

$$U=1-\frac{\sum |R_i-\bar{R}|}{n\bar{R}} \quad (1)$$

(3) 数据监测系统。主要包括体积含水率、基质吸力、孔隙水压力三种传感器及相应的数据采集系统。其具体量测范围及精度详见表 1。

1.2 试验方案

为探究降雨在不同结构堆积体中的入渗情况,本试验配制了 2 种结构类型的堆积体土样(几何相似比为 1:240)来展开室内模型试验研究。试验用土取自汉源县某冰水堆积体,土样以灰岩为主,颜色灰黄,结构较密实,属于含细粒角砾土。其基本参数和颗粒级配曲线如表 2 及图 1 所示。

表 1 数据采集仪及传感器

指标	传感器名称	采集仪名称	量测范围/kPa	精度/%
体积含水率	ECH ₂ O-5(EC-5)	Em50 型自动数采仪	0~60	±2
基质吸力	Campbell257	CR1000 数采仪	0~100	±2
孔隙水压力	HC-25	HCSC-16 数采仪	0~5	±1

表 2 试验用土的基本参数指标

土样	孔隙率	天然密度/ (10 ³ kg·m ⁻³)	天然含水率/ %	饱和渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	细颗粒 含量/%	砂粒组 含量/%	角砾含量/ %
含细粒角砾土	0.3~0.4	2.02~2.15	4.3~5	0.0025~0.005	10	22.8	65

两组模型分别为均质型、裂隙发育型土样。土坡全长 150 cm,坡顶高 80 cm,长 60 cm;坡趾高 50 cm,长 30 cm。均质型土样按照堆积体的正常颗粒组成配比;裂隙发育型中主体与均质模型相同,裂隙由有

机透水玻璃板隔离形成,位于坡顶 20 cm 和 30 cm 处,深度对应为 40 和 25 cm。两组模型的土坡坡度均设置为 23.2°。当湿润锋完全到达坡底且传感器数值稳定不变时试验终止。

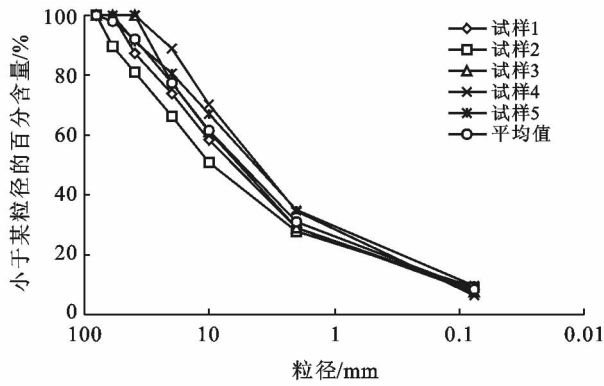
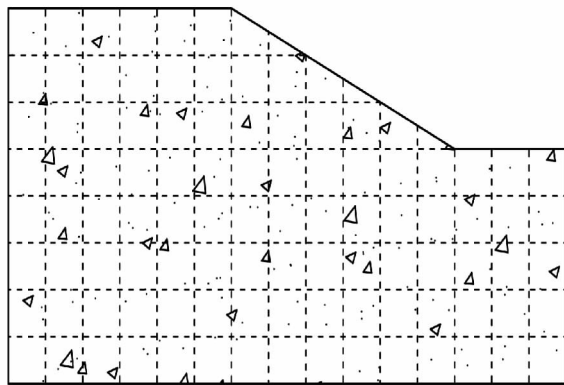
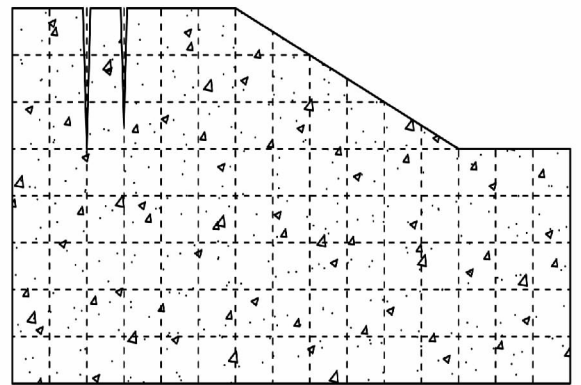


图 1 试验用土的颗粒级配曲线



均质模型



裂隙发育模型

图 2 两组试验分层夯实填筑的边坡完成图

2 结果与分析

2.1 均质堆积体模型

2.1.1 体积含水率的变化 图 3 为均质堆积体体积含水率随降雨历时的变化。由图 3 可知,降雨过程中,湿润锋以均匀方式向下入渗。降雨历时 23.21 h 后,湿润锋到达浅层 M_1 和 M_2 位置,含水率分别升高至(18.3%,18.4%)后达到第 1 个峰值 19.5%,随后因降雨停止,两测点含水率逐渐减小,曲线回落。降雨历时 30.45 h,湿润锋到达中部 M_3, M_4 的位置, M_3 达 11.8%,而 M_4 则与 M_2 以相同的变化趋势较平稳回落到 10% 左右。底部 M_5, M_6 依然无变化。第 3 天进行第 2 阶段降雨(距首次降雨历时 72 h), $M_1 - M_4$ 基本同时变化, (M_1, M_2) 分别达到第 2 个峰值 (20%,18%), (M_3, M_4) 达到 (30%,12%)。而 (M_5, M_6) 在滞后 4.8 h 后因上覆土层雨水下渗补给才首次出现升高,到达峰值 (46%,50%),降雨停止后, $M_1 - M_4$ 数值又再一次出现回落, M_3 降低为 20%,而 M_5, M_6 基本保持不变。历时第 5 d, M_1, M_2 含水率维持在 15% 附近波动,由于坡顶无表层雨水补给且雨水发生下渗,含水率数值略有减小;而坡中 M_3, M_4 因接受坡顶上覆土层雨水下渗影响,数值迅速增大到 48%

两模型中各自埋设了 6 个含水率、4 个孔压和 4 个基质吸力传感器以监测降雨过程中模型不同部位含水率、孔压和基质吸力的变化。

传感器布置位置以装置左上边界为坐标原点,坡顶,坡中,坡底仪器埋设坐标分别为(10,10 cm),(60,10 cm);(10,40 cm),(60,40 cm);(10,60 cm),(60,60 cm)。其中坡中位置只埋设含水率仪器,其他位置埋设三种仪器。试验分层夯实填筑的土坡完成图如图 2 所示,填筑完成的土坡四周抹有防水试剂以减小边界效应。

和 40% 左右,坡底 M_5 保持不变, M_6 减小。对比降雨前后可以发现,坡顶和坡中位置受降雨影响变化更为明显,雨水的下渗直接引发测点数值的变化,下渗完成后数值减小明显,而坡底只有在雨水完全下渗至土地底部时,其数值才增大,表现出一定的累积效应。

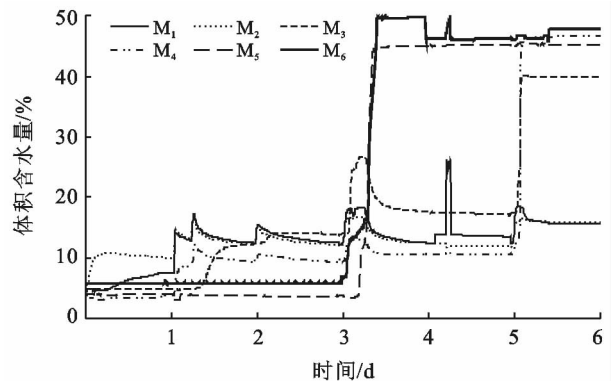


图 3 均质堆积体体积含水量变化曲线

2.1.2 基质吸力的变化 均质堆积体吸力变化曲线如图 4 所示,各测点 (S_1, S_2, S_3, S_4) 吸力初始值范围在 91.9~98.7 kPa 之内。降雨后,坡顶 (S_1, S_2) 降低到最小值 (9.7, 18.3 kPa) 历时分别为 10.28 和 12.38 h。而坡底位置 S_3 则历经 22.35 h 降低到 10.6 kPa。 S_4

则经过达 48 h 的过渡期后才出现降低,数值为 12.7 kPa。当降雨完全结束后,坡顶测点(S_1, S_2)最终达到 9.7 和 13.6 kPa,而坡底测点(S_3, S_4)吸力值降低到各自的最小值,分别为 10.0 和 11.3 kPa。试验结果表明,在降雨开始后,基质吸力并不会立即发生变化,当湿润锋缓慢向下迁移到达各测点时,基质吸力才会开始骤然减小,一旦降雨停止,基质吸力会出现回升,同时坡顶和坡底变化不同,坡底测点会经历一个较为平缓的过渡期,尤以 S_4 过渡期时间最长,随后才会出现降低。

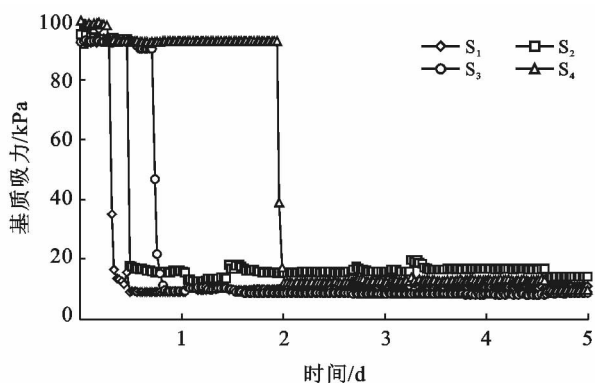


图 4 均质堆积体基质吸力变化曲线

2.1.3 孔隙水压力的变化 均质堆积体孔压变化如图 5 所示。降雨开始后,坡顶测点(P_1, P_2)早期基本趋于动态变化,集中在 0.1~0.3 kPa 左右。降雨后第 3 d,坡顶两测点孔压出现明显升高,最高时刻(P_1, P_2)峰值可达(1.6, 0.6 kPa)。降雨暂停后,孔压出现首次降低,当再次恢复降雨时,坡顶测点受雨水补给作用,孔压升高到新峰值约 1.8, 0.7 kPa。而对于测点(P_3, P_4)来说,其位置居于坡底,降雨过后因下渗缓慢,并没有明显的变化,直到两轮降雨后坡底才首次出现增大,其孔压数值为(1.0, 1.3 kPa),达峰值后进入过渡期,下渗变缓,数值变化平稳,时长约 1 d。当达到第 5 d 时,坡底测点数值迅速增加,达到本次试验的最大值 4.5 和 4.3 kPa,随着整个降雨过程的结束,后续阶段因雨水下渗数值还会有所降低,最终到 4.1 和 3.7 kPa 时达到稳定状态。

2.1.4 均质型湿润锋形态的变化 由图 6 可以看出,均质堆积体历时 119.35 h 完全渗透到装置底部。降雨过程中,历时 23.18 h 坡表发生浸润且雨水完全入渗,坡顶与坡脚之间各部分差异不大,其湿润锋形态大致与坡面平行,下渗深度约 10 cm;当历时 53.70 h 后,入渗基本到达中部,下渗速率相对变缓,入渗深度达 30 cm,湿润锋形态则无太大变化;历时 78.25 h 后,湿润锋到达坡体中下部位,入渗速率减慢且整个

入渗过程进入稳定阶段,此时湿润锋形态差异变得较为明显,为近似的下凹圆弧,中部下凹率更大,两端入渗较为缓慢,坡上位置下渗速度较坡顶和坡脚更为快速,入渗深度最大达 50 cm;当湿润锋接近土体底部时,湿润锋锋面近似平行于装置底面,降雨历时 117.30 h,入渗基本达到饱和入渗阶段,此阶段土体含水量达到饱和,其数值达峰值后趋于稳定,且坡脚处逐渐产生积水。

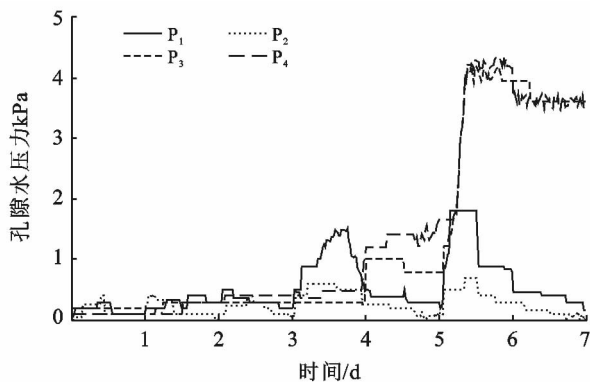


图 5 均质堆积体孔隙水压力变化曲线

2.2 裂缝发育堆积体模型

2.2.1 体积含水率的变化 图 7 为裂缝发育堆积体的土体含水量变化曲线图。降雨 8 h 后,各测点含水量均开始响应并急剧增加,变化趋势大致相同,随后雨水下渗,各测点(M_2 和 M_5 外)含水量出现下降,数值波动逐渐趋于稳定。在此阶段内,位于同一水平位置的 M_1, M_2 测点变化略有不同, M_1 由初始的含水量 5% 增加到 17.8%,而 M_2 滞后约 12 min 后才发生变化,所达到的峰值 12.4% 略小于 M_1 点,并且后续数值也不会减小。当第 2 次降雨时,各测点的含水量再次发生波动,整体呈增加趋势, (M_3, M_4) 降雨后含水量稳定在(15%, 21%),而以 M_5 增长幅度达到最大,从 13% 增长到 42%, M_6 变化幅度次之,由 20.7% 增加到 28.3%,到达峰值的时间比 M_5 略有滞后,滞后时间大约为 6.8 h,之后一直稳定在峰值水平上,其他测点变化不大。分析认为这是由于 M_5 测点位置位于裂缝底部,雨水在裂缝附近产生富集,导致下渗更为迅速,同时雨量也更大,相同时间内通过的雨量更多,这也与坡上 M_1 早于 M_2 发生变化且含水量大于 M_2 的情况相吻合。

2.2.2 基质吸力的变化 图 8 为裂缝发育型堆积体基质吸力随降雨历时的曲线变化图。各测点吸力初始值在 93~98 kPa 之间。当降雨开始后,吸力值都出现不同程度的减小, S_1 由初始值 96 kPa 降低到最小值 10 kPa。同 S_1 相比, S_2 经历了一段过渡期, S_2 降低到 83 kPa 后经过一个为期约 6.4 h 的平稳变化期才降低

到 16 kPa,最后趋于稳定。当湿润锋入渗到达(S_3, S_4)时, S_4 与 S_2 的变化趋势大致相同,也是经过一个过渡

期后才再一次减小为 9 kPa,过渡期长达 23.72 h 左右, S_3 则直接降低到最小值 9 kPa,之后波动不大。

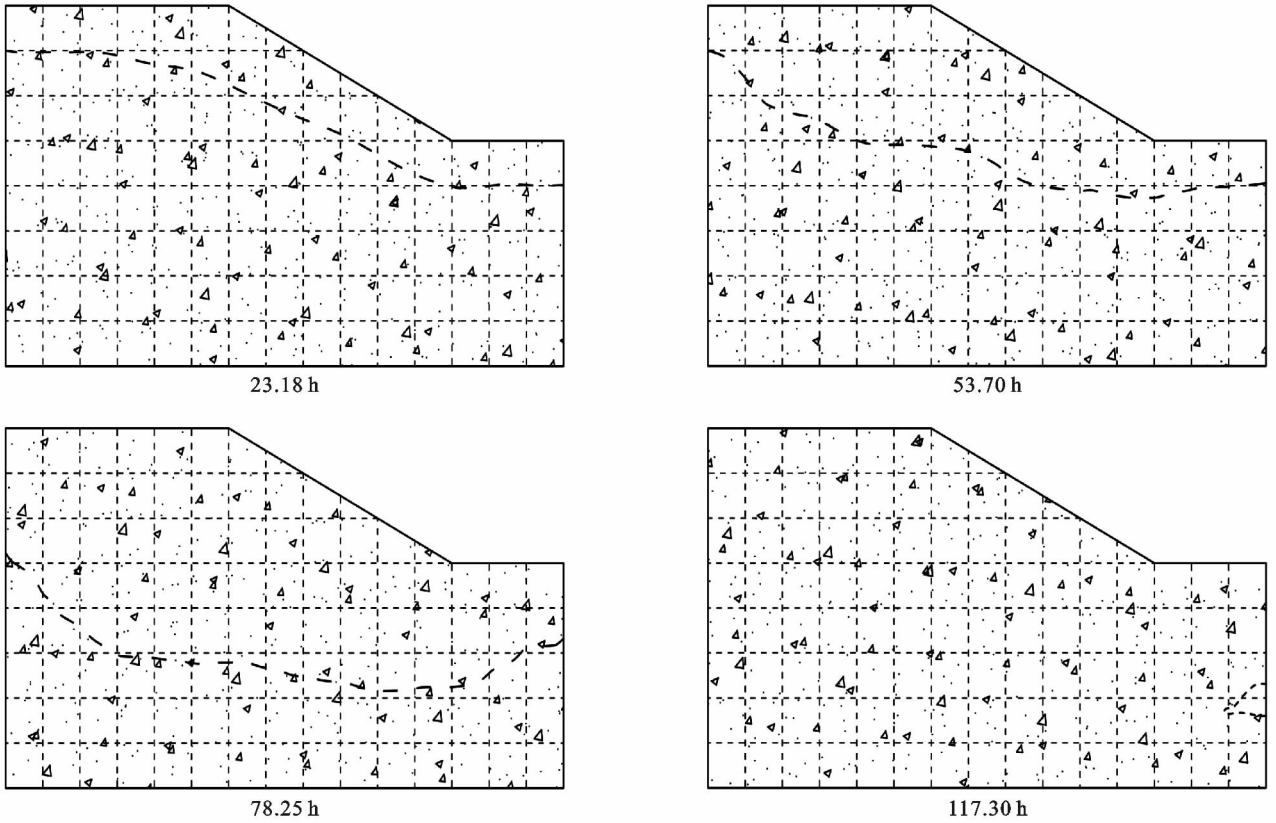


图 6 均质堆积体湿润锋形态变化

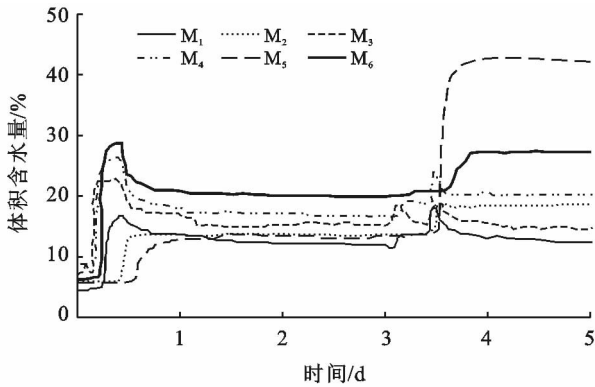


图 7 裂隙型堆积体体积含水量变化曲线

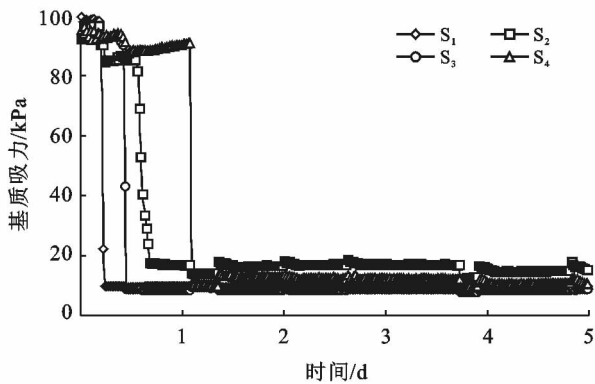


图 8 裂隙发育堆积体基质吸力变化曲线

2.2.3 孔隙水压力的变化 图 9 为裂隙模型的孔压变化曲线图。

从图 9 可以看出, (P_1, P_2) 曲线变化趋势不大, 总体在 0.5 kPa 的范围内进行波动, 降雨后, 坡顶测点孔压峰值最大可达 0.73 kPa, 之后降雨历程中始终无法超越这一峰值, 推测可能是雨水经裂隙直接产生下渗, 没有途经传感器埋设位置。而裂隙处与坡脚处的底部孔隙水压力 (P_3, P_4) 曲线变化趋势相似, 随着降雨的进行都表现出随时间呈阶梯式累积增大的特点, 增大效果在第 4 天以后越发明显, 最终分别达到四组测量值中的最大值, 为 2.6 和 2.0 kPa, 明显高于坡顶测点 (P_1, P_2)。而同一时刻裂隙底部的孔压 P_3 总是大于坡脚底部的孔压 P_4 , 超出约 0.5 kPa, 且在接近第四天左右裂隙底部的孔压 P_3 出现突变增大, 较坡脚处底部的孔压增大趋势有所区别。分析认为降雨后雨水向裂隙中汇流, 入渗流速大于湿润锋出渗流速使雨水在裂隙部位产生大量积聚, 积聚的雨水大部分在重力作用下随着裂隙向土体底部渗流, 少部分雨水在裂隙底端与土体交界面处向四周扩散, 从而使裂隙处的测点均形成高孔压, 同时刻高于其他位置的孔压记录值。

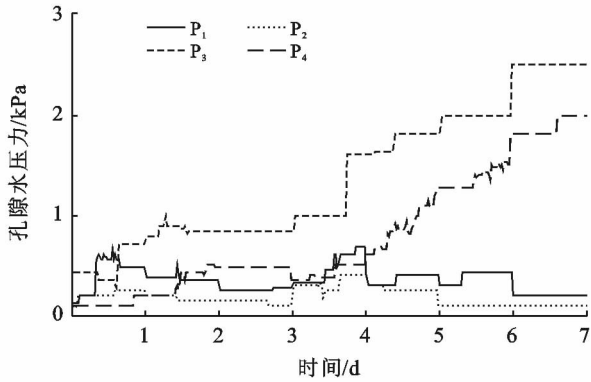


图 9 裂缝发育堆积体孔压变化曲线

2.2.4 裂缝发育型湿润锋的变化 裂缝发育型堆积体历时 93.62 h 完全渗透到装置底部。降雨后,坡表及裂缝表层逐渐浸润,湿润锋变化情况与均质堆积体的变化情况相似。土体表面完全湿润后,雨水逐渐聚积产生入渗,入渗过程中测点在湿润锋到达后依次响应,响应时间着埋深的增加而加大。当历时 54.28 h,湿润锋到达中部 55 cm 处,裂缝两侧入渗情况出现差异(如图 10 所示),裂缝左侧入渗明显变缓,入渗深度基本维持在 10 cm 位置,而由于土体的渗透系数远远

小于裂隙的,经裂隙流下来的雨水不能及时下渗从而积聚在两条裂隙底部,形成高孔压状态的椭圆形暂态饱和区。随着湿润锋继续向下迁移,裂隙末端的暂态饱和区逐渐扩散,与经坡表下渗下来的湿润锋连成一体,整个湿润锋面呈现为漏斗形下渗。当历时 76.47 h,坡体两端的湿润峰任然维持在浅表层,而坡上位置湿润锋下渗到达 70 cm 处时上下出现连通,湿润锋变为脚杯状,因底板不透水,下渗下来的雨水积聚在底部并向两侧水平侧渗,之后下渗与侧渗同时进行(图 10)。当历时 88.72 h,湿润锋触底湿润,水平侧渗到达边界,坡体两侧中部位置出现入渗盲区,而坡体两侧湿润锋形态的改变推测是因为底部土体压实不够紧密,颗粒之间存在局部空隙,使下渗的雨水从架空部位溢出。当历时达到 93.62 h,入渗完成,整个模型完全湿润。该组试验中,雨水经透水能力强的裂缝下渗进入土体深部,裂隙作为下渗的优势通道,使得湿润锋的迁移能力加强,同期时间内能够更快速的到达土体底部。湿润锋面在该区域将产生强烈下凹,形成圆弧形渗透“漏斗”,同时积聚在裂隙上的水分通过孔隙逐渐向土体周围扩散,这也加快了裂缝附近区域湿润锋的下移速度。

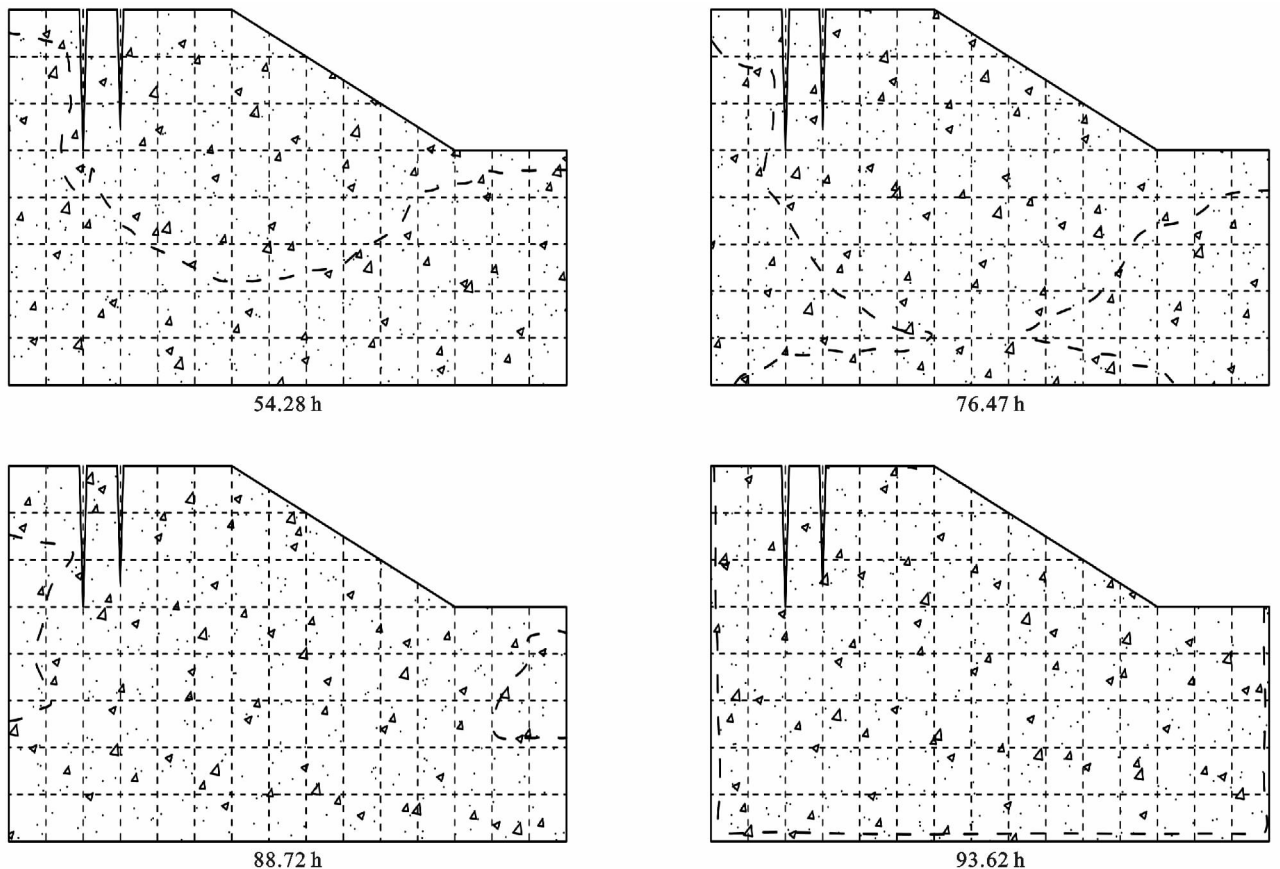


图 10 裂缝发育堆积体湿润锋形态变化

3 讨论

降雨可诱发斜坡覆盖层产生失稳破坏,但是除了少数架空明显、整体透水能力强的堆积体外,雨水要进入深厚堆积体的深部,往往还与堆积体结构特征相关。而堆积体局部发育的裂缝不仅会降低土体的抗剪强度,还会构成雨水入渗的优势通道,使土体的渗透性加强。

3.1 裂隙对入渗过程的影响

裂隙模型试验中,裂隙构成雨水进入土体深部的优势通道,该区域内仪器的响应时间较早,湿润锋触底时间大大缩短。根据试验过程中3种传感器的变化情况以及湿润锋的运移规律大致将裂隙模型入渗过程分为四个阶段:

3.1.1 完全入渗阶段 降雨初期土体含水率低,雨水浸入表层土体后迅速润湿,湿润锋向下迁移速率较快,各部位入渗深度大体一致但入渗深度尚浅,雨水下渗引发含水率和孔压增大,基质吸力减小,整个湿润锋面与坡面平行。

3.1.2 裂隙局部强烈下渗阶段 当雨水持续性下渗,裂隙区域内雨水产生汇集并在裂隙底部形成暂态饱和区,饱和区内孔压值高于同期其他位置而形成压力渗透,促使雨水下渗程度更为强烈,缩短了入渗时间,裂隙底部入渗深度加大,相比于均质模型,湿润锋到达同期坡体中部位置的时间缩短约27.53 h。饱和区形成的根本原因在于坡体雨水入渗流速大于湿润锋出渗流速,从而产生局部积聚。

3.1.3 补偿加速入渗阶段 裂隙底部形成暂态饱和区后,加速了雨水的有压入渗,湿润锋在上部雨水补给作用下向下迁移力度加大,促使暂态饱和区向堆积体深部继续扩展,饱和区内雨水积聚引起更大区域的扩散和土体逐渐饱和。裂隙的汇水作用,增大了裂隙底部的孔压值,使得孔压值高于同一时刻其他位置。

3.1.4 水平侧渗阶段 因装置底板为不透水层,雨水补给入渗使湿润锋触底后,积聚于底部的雨水只能向模型箱两侧渗透,致使坡体底部虽渗透至饱和,但坡体两侧中部位置仍有未曾润湿的干燥区域。再者,裂隙区域内经过补给入渗阶段后,湿润锋的下渗速度较两端部位置更快,在其先期触底后于坡体中部位置两端形成干燥的阻隔区域,阻隔区域存在时间不长,

在上部渗流补给作用下逐渐缩小,最终消失坡体完全浸润。

4 结论

(1) 均质模型中湿润峰均匀下渗,锋面达测点后引发孔压及含水率减小和基质吸力增加;坡顶受降雨影响变化明显,而坡底变化具有累积效应。

(2) 裂隙构成雨水入渗的优势通道,其底部会形成暂态饱和区,湿润锋面在该区域产生强烈下凹形成渗透“漏斗”,促使湿润锋在该区域先期触底。

(3) 降雨入渗过程为:①均质型:完全入渗→入渗放缓→稳定入渗→饱和入渗;②裂隙发育型:完全入渗→局部强烈下渗→补偿加速下渗→水平侧渗。

[参 考 文 献]

- [1] 许建聪,尚岳全,王健林. 松散土质边坡滑坡位移与降雨量的相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1):2854-2860.
- [2] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体边坡人工降雨木你试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1931-1936.
- [3] 王一兆,隋耀华. 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4):122-125.
- [4] 郁舒阳,张继勋,任旭华,等. 降雨类型对浅层深层滑坡渗流及稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3):123-127.
- [5] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1):198-204.
- [6] 杜婷婷,李志清,王小明,等. 黄土边坡降雨冲刷模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3):733-740.
- [7] 刘博,孙树林,刘俊,等. 降雨入渗条件下裂隙发育的黄土边坡稳定性分析研究[J]. 工程勘察, 2006(10):16-21.
- [8] 姚海林,郑少河,葛修润,等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2):2331-2335.
- [9] 张维,张国宝,魏星,等. 裂隙位置及深度对膨胀土边坡稳定性影响分析[J]. 路基工程, 2018(3):20-25.
- [10] 陈善雄,戴张俊,陆定杰,等. 考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 路基工程, 2014, 12(45):1442-1449.
- [11] 辛明明,杜友福. 膨胀土裂隙生成特征研究[J]. 建材世界, 2016, 32(6):17-20.