

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈 星, 刘 悦

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, CHEN Xing, and LIU Yue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究

A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test

李任杰, 胡富杭, 石豫川, 王磊, 吕可伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 145-152

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202019

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 等. 黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 119-128.
YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, *et al.* A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 119-128.

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

余岱金¹, 黄强兵¹, 康孝森¹, 陈 星², 刘 悦³

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 3. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了扩大可用耕地面积, 延安地区开展了一系列的治沟造地工程, 在填方坡体与原始坡体之间形成了接触界面, 这类界面潜在影响着填方坡体的渗流变形破坏。针对延安地区治沟造地工程黄土填方边坡已有的和潜在的变形破坏问题, 通过室内黄土边坡降雨模型试验, 研究了界面对黄土填方坡体渗流特性与变形破坏的影响规律, 揭示了界面渗流影响下填方边坡的破坏机制。结果表明: (1) 界面是黄土填方边坡雨水入渗的优势渗流通道, 雨水沿界面入渗至填方体中部和底部, 界面入渗与坡面入渗雨水一并汇集于填方体中部, 加速了填方体的饱和进程, 改变了填方体的渗流场和有效应力场, 坡顶与坡肩处产生张拉应力, 诱发多条张拉裂缝萌生和扩展; (2) 填方体坡脚中部先小范围侵蚀, 随后中部产生大范围侵蚀破坏, 进而触发填方体中部和底部产生较大规模的浅层滑动, 加剧了填方体坡顶与坡肩裂缝的萌生和扩展, 形成了多个优势渗流通道和复杂地质地貌条件, 降低了填方体的局部稳定性。上述研究结果对黄土填方边坡稳定性评价和提高治沟造地工程使用寿命具有较好的指导意义。

关键词: 治沟造地工程; 黄土; 边坡; 模型试验; 界面渗流; 破坏机制

中图分类号: P642.13⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0119-10

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

YU Daijin¹, HUANG Qiangbing¹, KANG Xiaosen¹, CHEN Xing², LIU Yue³

(1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Anhui Transport Consulting & Design Institute Co. Ltd., Hefei, Anhui 230088, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: A series of Gully Reclamation Projects were carried out in Yan'an City to expand the area of available arable land. In these projects, contact interfaces formed between filled slope and original slope potentially influenced the seepage deformation and failure of the loess-filled slope. This paper aims to solve the deformation and failure of loess-filled slope in Yan'an City using the indoor rainfall model test. The influence of interface on seepage characteristics and deformation failure of loess-filled slope is analyzed, and the failure mechanism of loess-filled slope affected by the interface is revealed. The results show that: (1) the interface is a dominant seepage channel for rainwater infiltration in the loess-filled slope; along the seepage channel, rainwater infiltrates

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-04-02

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790443; 42041006); 国家重点研发计划课题(2017YFD0800501)

第一作者: 余岱金(1998-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土填方边坡变形破坏机理研究工作。E-mail: 444528101@qq.com

通讯作者: 康孝森(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学与地质灾害方面的研究和教学工作。E-mail: kangxs@chd.edu.cn

into the middle and bottom of the filling body and gathers in the middle of the filling body with the infiltration rainwater from slope surface; the process accelerates the saturation process of the filled slope, changes its seepage field and effective stress field, causes tensile stress at its top and shoulder, and induces the initiation and expansion of multiple tension cracks. (2) In the process, a small range of erosion occurs in the middle of the slope toe, and a large range of erosion damages in the middle of filled-slope surface; the erosion damage triggers a large-scale shallow sliding in the middle and bottom of the filled slope, and further intensifies the initiation and expansion of cracks at the top and shoulder of the filling body; finally, multiple dominant seepage channels and complex topographic feature are formed, and the local stability of loess-filled slope is gradually reduced. The research results are important for the stability evaluation of loess-filled slope and the service life of the Gully Reclamation Projects.

Keywords: the Gully Reclamation Project; loess; slope; model test; interface seepage; failure mechanism

黄土高原治沟造地工程涉及范围广, 改造程度深, 形成了大量的黄土填方边坡; 填方坡体与原始坡体之间存在一个接触界面, 这个接触界面可能对黄土填方体渗流特性和破坏模式有一定潜在影响。2013 年 7 月延安地区遭受强降雨袭击, 治沟造地农田不同程度受灾, 治沟造地工程中一些潜在问题突显^[1], 因此迫切需要研究这类界面对填方边坡的影响规律和机制。

降雨是黄土挖填方边坡病害的主要诱因。2008 年强降雨诱发的吕梁枣林沟滑坡造成 6 人死亡^[2]; 2011 年持续降雨引起的白鹿原滑坡造成 32 人受伤^[3]; 2013 年持续强降雨导致延安某滑坡前缘蠕变复活, 最终滑坡前部于 2014 年发生滑塌, 所幸预警及时未导致人员伤亡^[4]。这类病害均受黄土渗透性的影响, 但是重塑土与原状黄土的渗透性差别较大^[5], 不同温度、不同干密度下黄土的渗透性也会发生变化^[6-7]; 另外, 黄土湿陷性也会使不同应力条件下的土骨架发生垮塌^[8], 控制黄土边坡的破坏。饱和黄土一般采用饱和渗透定律进行渗流计算, 而延安南沟地区虽然常年降雨, 但是绝大部分的黄土边坡仍处于非饱和状态^[9]。非饱和黄土在降雨过程中发生的稳态渗流^[10]与非稳态渗流^[11]均影响边坡内的水分分布, 进而显著影响黄土填方边坡的稳定性^[12-13]; 尤其是接触界面处, 其饱和与非饱和状态复杂, 导致其渗流规律复杂。这种复杂的渗透规律可通过室内物理模型试验进行研究。

诸多学者通过物理模型试验研究了降雨强度对土质边坡的影响, 确定了降雨作用下土质边坡失稳的门槛累积雨量^[14-15]; 通过离心机试验分析了降雨作用下边坡渗流特性^[16]; 结合现场监测和模型试验, 分析了现场实际边坡的雨水入渗规律^[17-18]。但上述研究尚不能揭示接触界面对填方体的影响规律。实际上,

在延安治沟造地工程中形成了很多复杂的地质界面, 这些地质界面大多为土-土接触界面, 可能形成优势渗流通道, 影响雨水的入渗能力。前人主要研究基岩-土接触界面^[19]、土与结构面^[20]、土与岩石^[21-22]等, 而且由于施工方法、技术限制等因素的影响, 人工形成界面两侧岩土材料强度的差异性一般不会控制破坏面的发展, 因而通常使用性质不同的材料模拟界面。界面两侧同为土层即土-土接触的黄土填方边坡降雨试验研究目前仍然较少, 土-土接触的填方边坡渗流失稳机制尚不清楚, 制约了延安南沟治沟造地填方边坡病害防控。

因此, 本文以延安南沟 1 处填方边坡为原型, 采用渗透性较好的窗纱布模拟土-土接触界面, 开展室内降雨模型试验, 测定黄土填方边坡界面及其两侧土体的含水率增量、孔隙水压力增量变化, 阐明降雨作用下土-土接触填方界面渗流过程, 揭示土-土接触界面对黄土填方边坡界面渗流及变形破坏的影响机制。

1 黄土填方边坡降雨模型试验

1.1 治沟造地工程背景

延安地区开展治沟造地工程以来, 扩大了可用耕地面积, 治理了水土流失等灾害问题^[23], 但也面临着挑战。治沟造地形成的黄土填方边坡, 在极端天气影响下虽然未发生较大规模的滑坡灾害, 但出现了明显的垮塌、坡面破坏、坡脚冲蚀及坡顶张拉裂缝等病害问题(图 1), 影响了治沟造地边坡和沟道农田的有效利用。尤其是填方边坡中填方体与天然黄土边坡的接触界面可能是优势渗流通道, 影响雨水入渗, 导致填方边坡病害。

1.2 试验装置

试验装置包括控制系统、降雨系统、供水系统及模型箱(图 2)。模型箱尺寸为 3.2 m(长)×1.4 m(宽)×

监测点的基准点,用来定位每排监测点的初始位置。填方坡顶插 2 排,坡面插 4 排,共 6 排,每排布置 5 个监测点,每排从左至右、从底至顶编号,见图 5(b)。

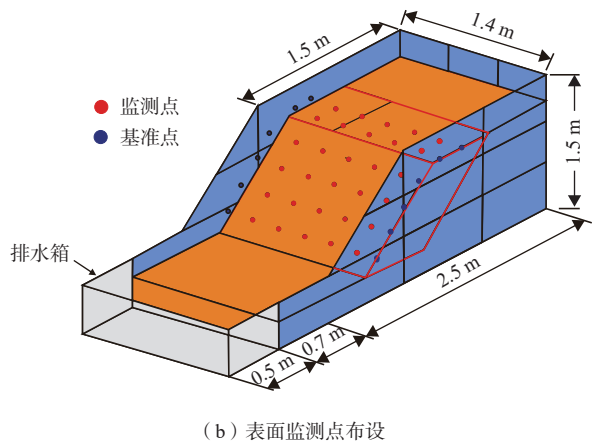
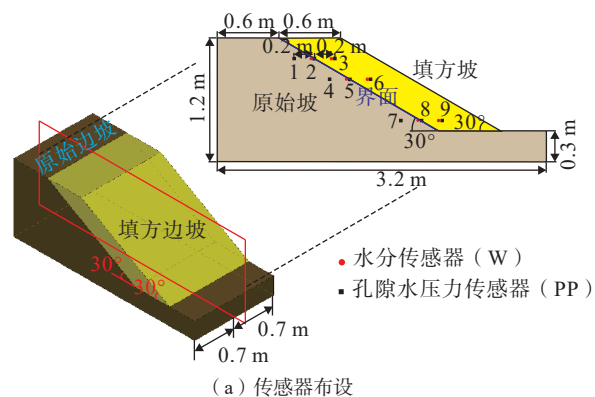


图 5 传感器与监测点布设

Fig. 5 Layout of sensors and monitoring points

1.5 降雨方案

根据延安气象资料,1 h 最大的降雨强度约为 62 mm/h(据中国气象数据网),根据降雨强度的相似

比 $C_q = C_1^{1/2} C_g^{1/2} = 5$, 降雨强度设计为 12.4 mm/h (C_g 为重力加速度相似比)。低降雨强度下 (<15 mm/h), 经过长时间降雨后, 降雨会出现不均匀现象, 同时由于重塑黄土的渗透性发生变化, 也会在坡底形成不均匀的积水, 干扰试验结果。为使降雨均匀, 边坡充分排水, 采用半小时降雨、半小时停雨的降雨方案, 控制每小时降雨量为 12.4 mm; 为模拟延安地区的常年降雨条件, 每日试验时长为 9 h, 降雨 9 次(表 2), 持续降雨 8 d。

表 2 每日降雨方案

Table 2 Rainfall schemes for one day

降雨次数	起止时间	降雨时间/min	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
第1次	9:00—9:30	30	12.4
第2次	10:00—10:30	30	12.4
第3次	11:00—11:30	30	12.4
第4次	12:00—12:30	30	12.4
第5次	13:00—13:30	30	12.4
第6次	14:00—14:30	30	12.4
第7次	15:00—15:30	30	12.4
第8次	16:00—16:30	30	12.4
第9次	17:00—17:30	30	12.4

长时间降雨下含水率与孔隙水压力变化率低, 边坡水量逐渐累积, 降雨前期的含水率与孔隙水压力变化往往持续累积至降雨后期, 干扰当天降雨变化量, 故定义“体积含水率增量”(Δw)分析界面含水率变化, $\Delta w = w_c - w_i$, w_c 为任意时刻实测含水率, w_i 为当天初始含水率, 以此消除前天含水率与孔隙水压力对当天数据的影响(图 6)。通过“孔隙水压力变化增量”(ΔP)分析界面孔隙水压力变化规律, $\Delta P = P_c - P_i$, P_c 为任意时刻实测孔隙水压力, P_i 为当天初始孔隙水压力, 基于该指标分析坡体孔隙水压力变化规律(图 7)。

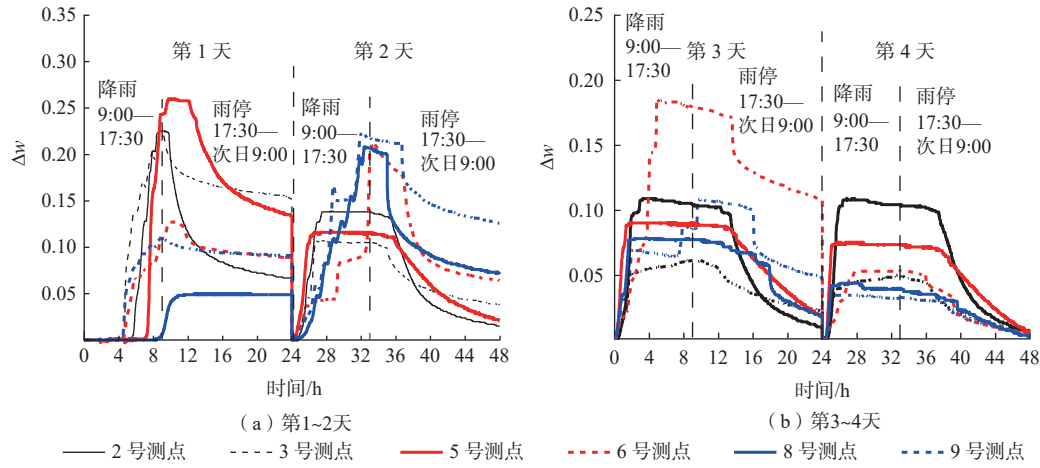


图 6 界面含水率变化曲线 (第 1~4 天)

Fig. 6 Curves of water content at interface (from 1st to 4th day)

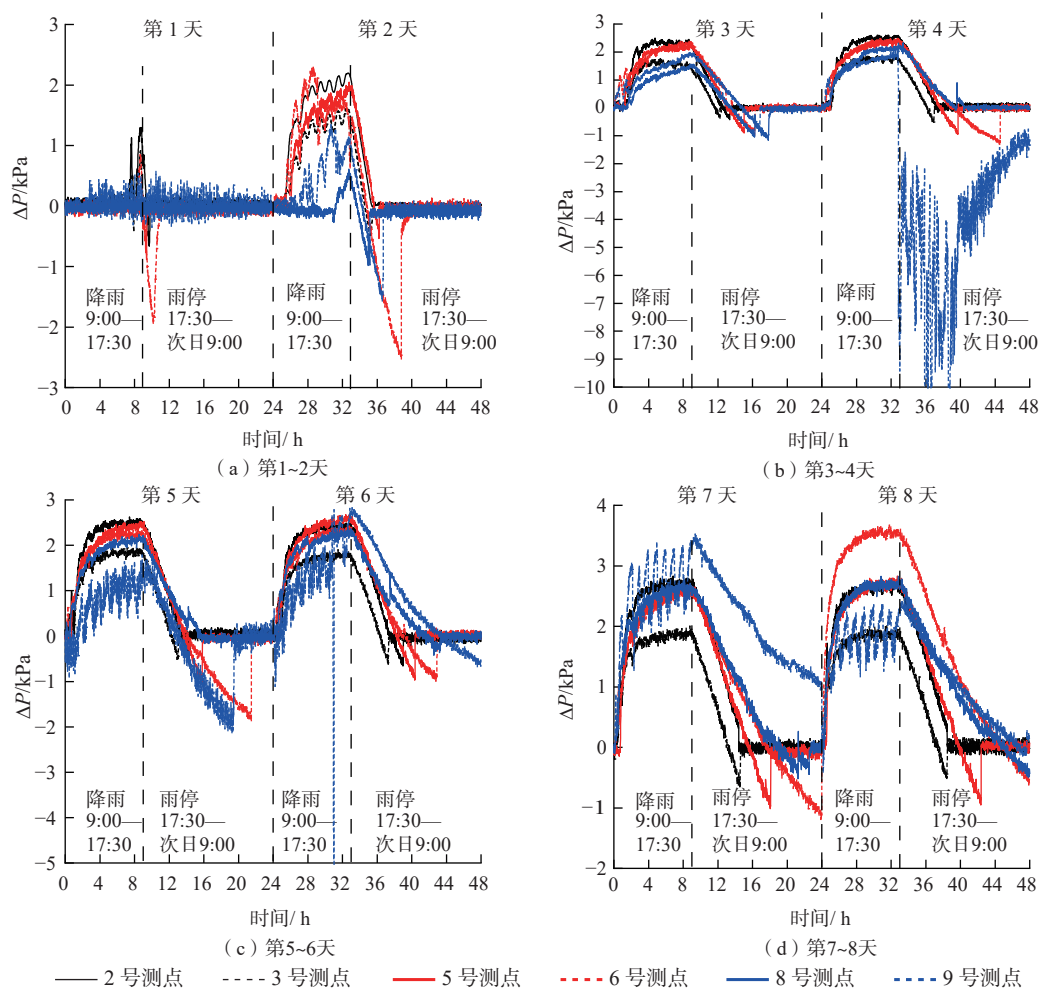


图7 界面处孔隙水压力变化曲线(第1~8天)

Fig. 7 Curves of pore pressure at interface (from 1st to 8th day)

2 试验结果

2.1 填方边坡界面的含水率激增与消散规律

第1天降雨, 界面顶部和中部的体积含水率增量 and 总量均大于其同一高程填方体, 填方体底部的体积含水率增量明显大于界面底部含水率增量, 如图6(a)所示。经15 h 停雨, 填方体顶部的体积含水率增量大于界面顶部。第2天降雨, 界面底部和填方体底部含水率激增, 界面底部体积含水率增量较第1天变化显著, 但仍小于填方坡体。第3天降雨, 填方坡顶体积含水率会略低于坡中和坡底, 除坡顶外同一高程处填方体的体积含水率增量均大于界面, 而第4天界面处所有高程的体积含水率增量均大于填方边坡, 如图6(b)所示。

2.2 填方边坡界面的孔隙水压力激增与消散规律

降雨第1天, 填方体出现较大负孔隙水压力, 界面底部孔隙水压力变化小, 填方体底部孔隙水压力变化大。降雨第2天, 界面顶部与中部孔隙水压力变化接

近, 而界面底部直至第2天降雨7 h 后才产生孔隙水压力增量。降雨第3天, 界面的孔隙水压力增量值趋于一致, 降雨结束后, 界面不同深度的孔隙水压力的消散速度不同, 界面顶部、中部及底部的孔隙水压力依次逐步消散, 如图7(a)(b)所示。降雨第4天雨停时, 填方体出现了较大的孔隙水压力增量负值, 证实了填方体中底部雨水汇集现象。

降雨第5~8天, 孔隙水压力变化率减小, 降雨结束后孔隙水压力逐步消散, 坡面破坏也使坡体内孔隙水压力释放, 如图7(c)(d)所示。降雨后期不同高程的界面处孔隙水压力在降雨时保持同样的增长趋势, 而处于同一高程的原始坡体与填方坡体孔隙水压力增量不相等。

2.3 填方边坡破面变形破坏过程

降雨第1天, 填方体坡面雨水径流至坡脚处, 坡脚土体饱和软化并产生泥流, 如图8(a)所示; 同时, 边坡中部出现浅落水洞, 沿坡脚方向展布。降雨第2天结

束后,坡面同时发生冲刷破坏和崩解破坏,因破坏而剥落的黄土覆盖在第 1 天产生的落水洞中,落水洞变浅,但破坏范围扩大,如图 8(b)所示。第 3 天降雨,坡面中底部发生 2 处浅层滑动,宽度分别为 74.2 cm 和

65.8 cm,通过测量监测点的位移,浅层滑动的滑距分别为 15 cm 和 18 cm,如图 8(c)所示。根据坡体监测点位移发现在 2 个浅层滑动上方还产生了小规模滑动破坏。第 4 天降雨之后坡面未发生新破坏。

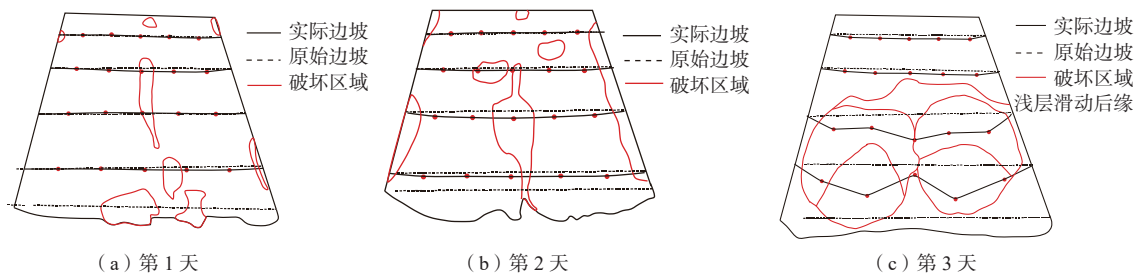


图 8 填方体破坏过程

Fig. 8 Failure process of the surface of loess-filled slope

第 3 天与第 4 天降雨使坡面依次产生 5 条张拉裂缝。第 3 天降雨过程中,坡肩附近产生了张拉裂缝 L1,如图 9(a)所示。在第 4 天降雨前,新出现 4 条裂缝,均位于填方边坡顶部区域,第 1 条裂缝 L1 宽度逐渐增大,如图 9(b)所示。第 4~9 天降雨前坡肩未发育新的裂缝,第 6 天开始, L4 和 L5 逐渐连通,且深度加深。降雨过程中坡面土体吸水饱和、软化、崩解,界面的存在使得填方体中部雨水富集,坡体内部黄土

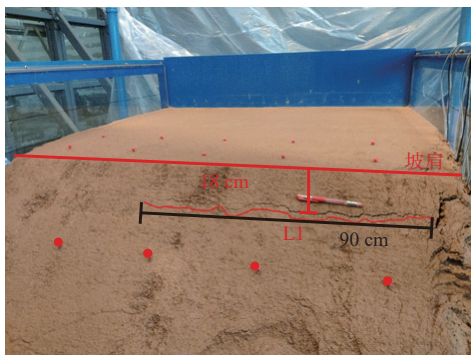
湿陷形成坑洞,表面崩解的黄土填充坑洞。

综上所述,在延安地区常年降雨条件下,界面对填方边坡的影响主要是裂缝和浅层滑动,裂缝主要在降雨结束后产生,当裂缝出现时,继续降雨加速边坡坡面破坏,产生大范围浅层滑动。降雨中后期,坡表无明显破坏,坡顶和坡肩产生较多裂缝,裂缝相互连通,不断加深加宽,形成了优势渗流通道。

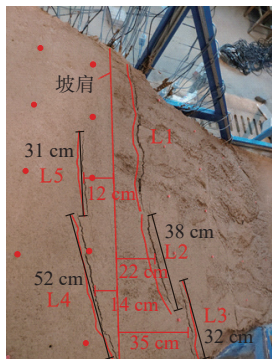
3 讨论

3.1 含界面黄土填方边坡渗流机制

第 1 天降雨,界面发生了优势渗流,见图 6(a),高程 1.0 m 处由于距离坡顶较近,渗流路径短,界面顶部的渗流优势不明显。填方体底部积水,沿界面向填方体内渗流,填方体和界面中部的基质吸力较大,雨水继续沿界面下渗的趋势降低,在填方体中部侧向渗流,见图 7(a)。界面底部孔隙水压力与填方体底部孔隙水压力变化不一致,说明降雨初期界面顶部虽为优势渗流面,但尚未与界面底部连通。底部界面也是一个优势渗流面,坡底积水,雨水沿底部界面更快进入填方体底部,并非从界面顶部渗流至底部。经 15 h 停雨,界面中部雨水向界面底部和填方体双向渗流,导致填方体的体积含水率增量大于界面处,在边坡坡顶附近,界面仍然有渗流优势。第 2 天降雨,界面底部表现出渗流优势,如图 6(a)所示。但第 1 天降雨时填方体底部入渗量大于界面底部入渗量,坡体底部排水不畅,开始积水,故第 2 天降雨时,即使界面底部体积含水率增量较第 1 天显著变化,但还是小于填方坡体。同一高程处孔隙水压力增量响应规律一致:孔隙水压力随降雨逐渐增大,降雨结束后孔隙水压力减



(a) 第 3 天降雨前



(b) 第 4 天降雨前

图 9 坡面裂缝图

Fig. 9 Cracks in slope surface

小, 孔隙水压力增量出现负值, 最终趋于 0。当孔隙水压力增量出现较大负值时, 说明基质吸力较大, 这会影 响坡体水分分布。第 3 天降雨前, 填方体顶部产生 裂缝, 降雨结束后坡底发生浅层滑动, 推测是坡体底 部和坡体中部雨水汇集, 黄土体发生局部崩解。如 图 6(b)所示, 第 3 天降雨中期, 界面优势渗流不显著, 这与降雨累积有关, 在坡顶位置, 界面依然存在优势 渗流, 每日降雨结束后雨水逐渐汇聚于坡底与坡中, 整个坡体未达到饱和, 所以降雨前坡顶体积含水率略 低于坡中和坡底, 界面顶部保持优势渗流。界面中部 集水能力降低, 但是依然具备一定的集水能力。当天 降雨结束后, 坡体发生了大面积浅层滑动, 表明雨水 已渗流至坡体内。降雨第 5~8 天, 随着持续降雨, 坡 体表面在降雨时破坏, 又在停雨后重塑, 干湿交替次 数增多, 坡面破坏也使孔隙水压力释放。降雨后期界 面渗流可能连通, 界面先达到饱和, 有渗流优势。

降雨过程中填方边坡由非饱和向饱和过渡, 饱和 度增大时黄土骨架易坍塌、颗粒易滑移^[26], 因此非饱 和特性显著影响入渗雨水在黄土填方边坡中的渗流

规律^[27], 填方体可简单划分为润湿区与非润湿区^[28]。 不含界面的黄土填方边坡裂缝产生于填方边坡的中 前缘, 雨水在填方边坡的坡顶处汇集, 坡体内不易产 生优势渗流^[29]。而含界面的黄土填方边坡界面渗流破 坏机制与之不同, 界面是一个优势渗流面, 雨水沿界 面发生非饱和渗流, 为填方体内提供了潜在湿润区, 加快了填方边坡的饱和过程, 加速了坡体表面破坏。

黄土填方边坡界面入渗过程与机制为: 在均匀降 雨过程中, 水分入渗在坡体表面和坡顶同时进行, 界 面的渗流优势使得雨水优先沿界面入渗, 降雨中后期 原始坡体和填方坡体的含水率增量与孔隙水压力增 量变化趋势一致, 界面的存在加速了填方边坡的饱和 进程, 如图 10(a)所示。在延安地区的常年降雨条件 下, 填方体底部积水, 水分通过界面底部优势渗流面 入渗, 导致填方边坡底部在降雨初期便有较高的含 水率, 如图 10(b)所示; 降雨中期, 前 1 次降雨与本次降 雨的雨水汇集于填方边坡中部, 填方边坡中部产生汇 水现象, 如图 10(c)所示; 降雨后期, 界面处渗流通道 贯通, 填方体中部与底部逐步饱和, 如图 10(d)(e)所示。

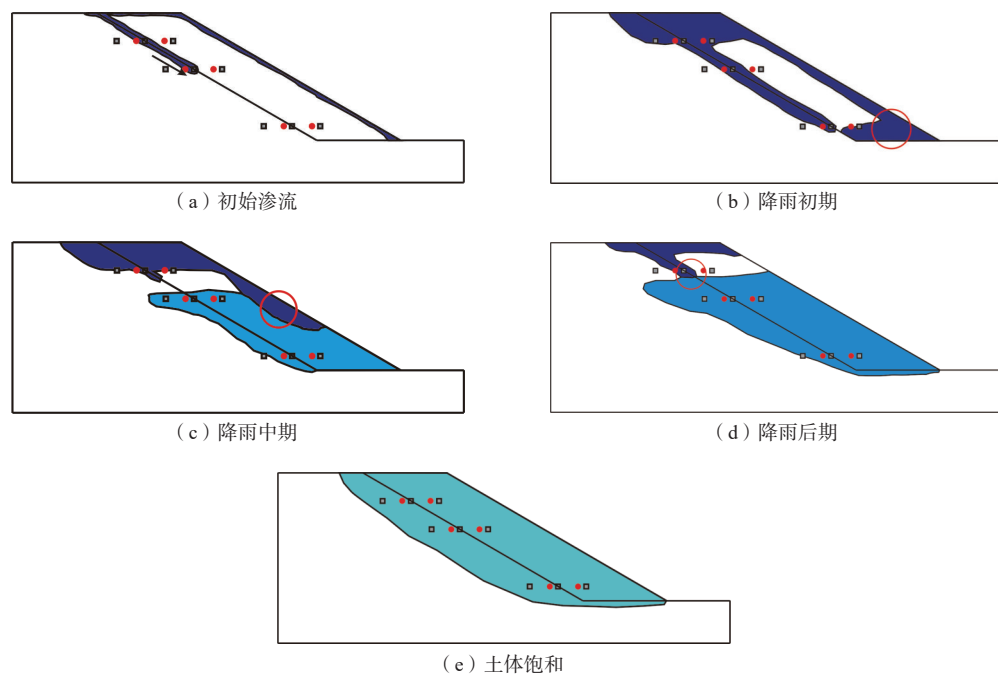


图 10 界面作用下填方体渗流过程

Fig. 10 Seepage path of loess-filled slope affected by interface

3.2 含界面黄土填方边坡坡面破坏机制

降雨第 1 天, 破坏主要由雨水冲刷导致, 如图 8(a) 所示。降雨第 2 天结束后, 在界面的影响下, 坡体中 部土体增湿加快, 如图 8(b)所示。降雨中后期(第 3~

4 天)容易发生浅层滑动, 第 3 天降雨过程中, 坡肩附 近的坡面产生了张拉裂缝(图 9), 结合含水率与孔隙 水压力的监测结果, 裂缝的产生与边坡降雨的滞后性有 关^[30], 雨水入渗使填方坡体逐步饱和, 发生蠕变, 继而

产生了张拉裂缝。在随后的降雨中,坡体中新发育了许多张拉裂缝,并且这些发育的裂缝逐渐连通。裂缝发育扩展说明:降雨过程中,一方面填方体自重逐渐增大,填方体顶部与中部产生较大拉应力;另一方面填方体含水率增大,有效应力降低^[31],抗拉强度降低,导致坡肩产生张拉裂缝。降雨过程中坡面饱和、软化、崩解,界面的存在使得填方体中部雨水富集,坡体内部黄土湿陷形成坑洞,表面崩解的黄土填充坑洞。第4天降雨之后坡面未发生新破坏,实际上坡体边坡表面经历3次干湿交替,土体崩解的速率变缓,抗侵蚀能力增强^[32],这是降雨中后期填方体未继续破坏的主要原因。界面作为优势渗流面,使雨水更快入渗到填方边坡深处,改变了填方边坡内水分分布,影响填方边坡有效应力分布,使降雨初期坡面顶部和降雨中后期坡顶、坡肩位置出现裂缝,随着持续降雨,边坡出现坡面冲刷、浅层滑坡或局部垮塌破坏。

界面对坡体渗流和坡表破坏的具体影响机制为:
①界面作为降雨入渗的优势渗流面,如图11(a)第1天所示,雨水沿界面渗流至填方边坡中底部(图11中A、B、C点),使湿润峰面在界面处更快地地下移至边坡中底部;②界面底部也同样为降雨入渗的优势渗流面,如图11(a)第2天所示,填方体底部积水,沿界面底部入渗至填方边坡内,造成了降雨初期填方边坡底部含水率升高的现象;③停雨后,前1次入渗的雨水沿界面向下至填方边坡中部,这一部分雨水与本次从边坡表面入渗的雨水在填方边坡中部汇集;④填方边坡的雨水聚集改变了应力场分布,导致了浅层黄土的局部崩解,应力分布的改变使坡体产生蠕变,见图11(a),在填方坡顶坡肩附近产生了多条裂缝,见图11(b),形成了多个优势渗流通道,浅层黄土的局部崩解触发坡表浅层滑动。

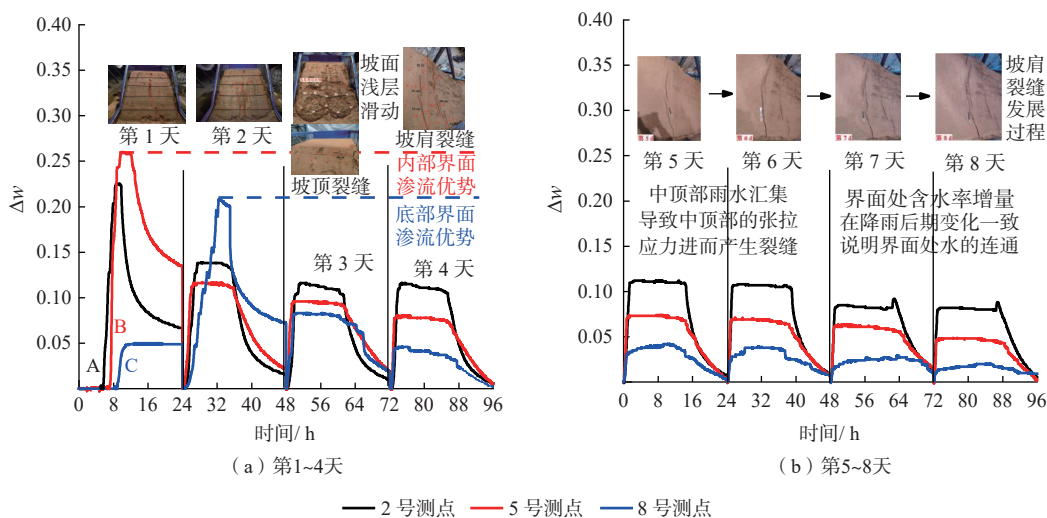


图 11 含界面填方边坡渗流与破坏关系

Fig. 11 Relationship between seepage and failure of loess-filled slope with interface

4 结论

(1)降雨初期,界面是一个优势渗流面,雨水沿界面自上而下非饱和渗流至填方体中部和底部,雨水还从填方体坡面垂直入渗,为填方体内提供了潜在湿润区,加快了黄土填方边坡的饱和和进程;降雨后期,界面先饱和,而后填方体逐步饱和。因此,界面控制着填方体内渗流场变化。

(2)降雨作用下填方体坡脚中部先发生侵蚀破坏,随后中部出现大范围侵蚀破坏,持续降雨下破坏区域逐步扩大,直至坡面中底部土体发生较大规模的

浅层滑动,又加剧了填方边坡坡顶与坡肩裂缝的产生与扩展,形成了多个优势渗流通道和复杂地貌条件,加剧了填方体坡面局部失稳。

(3)雨水入渗汇集于填方体中部,坡体含水率激增,填方体自重增大,填方体顶部与中部产生较大拉应力,这是填方体坡顶和坡肩张拉裂缝产生的主要原因;有效应力显著降低,抗剪强度参数亦降低,这是填方边坡中底部发生浅层滑动的主要原因。上述结果对黄土填方边坡稳定性评价和提高治沟造地使用寿命具有较好的指导意义。

参考文献 (References) :

- [1] 贺春雄. 延安治沟造地工程水毁成因及对策[J]. [陕西水利](#), 2014(1): 161 – 162. [HE Chunxiong. Causes and countermeasures of water damage in the Gully Reclamation Project of Yan'an[J]. [Shaanxi Water Resources](#), 2014(1): 161 – 162. (in Chinese)]
- [2] TANG D Q, PENG J B, WANG Q Y, et al. Lvliang typical loess landslide mechanism and characteristics[C]//ZHOU X J. Proceedings of the international conference on civil engineering and transportation (ICCET 2011). Jinan: Trans Tech Publications Ltd, 2011: 1313 – 1317.
- [3] ZHUANG J Q, PENG J B. A coupled slope cutting-a prolonged rainfall-induced loess landslide: A 17 October 2011 case study[J]. [Bulletin of Engineering Geology and the Environment](#), 2014, 73(4): 997 – 1011.
- [4] 薛强, 张茂省. 延安淹土安滑坡监测预警及变形特征[J]. [西北地质](#), 2018, 51(2): 220 – 226. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng. Monitoring, early warning and deformation characteristics of Yantu'an landslide in Yan'an[J]. [Northwestern Geology](#), 2018, 51(2): 220 – 226. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 徐盼盼. 重塑黄土渗透性变化的水-土作用机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2021. [XU Panpan. Study on water-soil interaction mechanism of permeability change of remolded loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHANG Y T, QIAN H, HOU K, et al. Investigating and predicting the temperature effects of permeability for loess[J]. [Engineering Geology](#), 2021, 285: 106050.
- [7] 张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 等. 压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究[J]. [水文地质工程地质](#), 2019, 46(6): 97 – 104. [ZHANG Zhenfei, NI Wankui, WANG Xijun, et al. An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2019, 46(6): 97 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG J D, LI P, MA Y, et al. Change in pore-size distribution of collapsible loess due to loading and inundating[J]. [Acta Geotechnica](#), 2020, 15(5): 1081 – 1094.
- [9] 李萍, 李同录, 王红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数Childs & Collis-Gerge模型预测[J]. [岩土力学](#), 2013, 34(增刊2): 184 – 189. [LI Ping, LI Tonglu, WANG Hong, et al. Soil-water characteristic curve and permeability prediction on Childs & Collis-Gerge model of unsaturated loess[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2013, 34(Sup2): 184 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [10] TIAN K L, YANG A Q, NIE K Y, et al. Experimental study of steady seepage in unsaturated loess soil[J]. [Acta Geotechnica](#), 2020, 15(9): 2681 – 2689.
- [11] 梁燕, 谢永利, 刘保健, 等. 非饱和黄土渗透性的试验研究[J]. [水文地质工程地质](#), 2006, 33(2): 27 – 30. [LIANG Yan, XIE Yongli, LIU Baojian, et al. A test study of the permeability of unsaturated typical loess[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2006, 33(2): 27 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 颜斌, 倪万魁, 刘海松. 黄土边坡降水入渗规律及其稳定性研究[J]. [水文地质工程地质](#), 2009, 36(3): 77 – 81. [YAN Bin, NI Wankui, LIU Haisong. Research on rainfall infiltration law and stability of loess slope[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2009, 36(3): 77 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李海亮, 黄润秋, 吴礼舟, 等. 非均质土坡降雨入渗的耦合过程及稳定性分析[J]. [水文地质工程地质](#), 2013, 40(4): 70 – 76. [LI Hailiang, HUANG Runqiu, WU Lizhou, et al. Rainfall infiltration coupling process and stability analysis of a heterogeneous soil slope[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2013, 40(4): 70 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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. [LIN Hungchou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2009, 28(1): 198 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. [Engineering Geology](#), 2004, 73(3/4): 247 – 265.
- [16] TIMPONG S, ITOH K, TOYOSAWA Y. Geotechnical centrifuge modelling of slope failure induced by ground water table change[C]//MCINNES R, JAKEWAYS J, FAIRBANK H, et al. Proceedings of the international conference on landslides and climate change. London: Taylor & Francis Ltd, 2007: 107 – 112.
- [17] TSAPARAS I, RAHARDJO H, TOLL D G, et al. Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes[J]. [Canadian Geotechnical Journal](#), 2003, 40(5): 1012 – 1032.
- [18] RAHARDJO H, LEE T T, LEONG E C, et al. Response of a residual soil slope to rainfall[J]. [Canadian Geotechnical](#)

- Journal, 2005, 42(2): 340 – 351.
- [19] LI C, YAO D, WANG Z, et al. Model test on rainfall-induced loess-mudstone interfacial landslides in Qingshuihe, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 1 – 18.
- [20] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431 – 435. [HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431 – 435. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王雷. 延安地区黄土-基岩接触面滑坡复活演化及机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2018. [WANG Lei. Study on resurrection evolution and mechanism of the loess-bedrock interface landslide in Yan'an area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李绍红, 朱建东, 王少阳, 等. 考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 131 – 135. [LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 131 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 贺春雄. 延安治沟造地工程的现状、特点及作用[J]. 地球环境学报, 2015, 6(4): 255 – 260. [HE Chunxiong. The situation, characteristics and effect of the Gully Reclamation Project in Yan'an[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 255 – 260. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈星. 黄土填方边坡界面效应及稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019. [CHEN Xing. Study on interface effect and stability of loess fill slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 采用不同滑面材料的滑坡模型试验研究[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 10 – 13. [LIU Hongjia, MEN Yuming, LI Xunchang, et al. Study on slip material in landslide model tests[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 10 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [26] WEN B P, YAN Y J. Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China[J]. Engineering Geology, 2014, 168: 46 – 58.
- [27] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [28] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics I. — The flow of air and water through soils[J]. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2015, 4(7/8): 1 – 24.
- [29] 陈林万, 张晓超, 裴向军, 等. 降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 151 – 160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 151 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [30] ZHANG S, ZHANG X C, PEI X J, et al. Model test study on the hydrological mechanisms and early warning thresholds for loess fill slope failure induced by rainfall[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105135.
- [31] 石振明, 赵思奕, 苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 135 – 140. [SHI Zhenming, ZHAO Siyi, SU Yue. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 135 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1273 – 1279. [WANG Jian, MA Fan, ZHANG Penghui, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1273 – 1279. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真