

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

连续降雨下黄土陡坡开裂及稳定性评价

王磊, 李荣建, 刘军定, 杨正午, 师金锋

Stability evaluation and cracking research of steep loess slope under continuous rainfall

WANG Lei, LI Rongjian, LIU Junding, YANG Zhengwu, SHI Jinfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211022003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究

Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall

水利水电工程学报. 2019(3): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.012>

锚索应力增量法评价边坡稳定性

Evaluation of stability of toppling slope by increment method of anchoring cable stress

水利水电工程学报. 2019(2): 8 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.002>

季节性供水渠道边坡稳定性研究

Research on the slope stability of seasonally running canals

水利水电工程学报. 2021(1): 124 <https://doi.org/10.12170/20200302002>

复杂双面边坡整体稳定性分析

Stability analysis of complex double-sided slope

水利水电工程学报. 2020(6): 72 <https://doi.org/10.12170/20190730001>

基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价

Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights

水利水电工程学报. 2017(1): 10 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.002>

库水与降雨对凉水井滑坡变形及稳定性的影响

Influence of reservoir water and rainfall on the Liangshuijing landslide deformation and stability

水利水电工程学报. 2019(2): 16 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.003>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211022003

王磊, 李荣建, 刘军定, 等. 连续降雨下黄土陡坡开裂及稳定性评价 [J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 77-86. (WANG Lei, LI Rongjian, LIU Junding, et al. Stability evaluation and cracking research of steep loess slope under continuous rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 77-86. (in Chinese))

连续降雨下黄土陡坡开裂及稳定性评价

王 磊^{1,2}, 李荣建¹, 刘军定¹, 杨正午³, 师金锋⁴

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000; 3. 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司, 陕西 西安 710100; 4. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 连续降雨导致边坡失稳破坏是黄土边坡常见的地质灾害之一。为了深入研究连续降雨对黄土陡坡渗流场、变形场及稳定性的影响, 利用具有侧向隔渗和纵向减阻作用的隔离槽技术对黄土陡坡的两侧降雨边界进行处理, 在此基础上开展黄土陡坡现场连续降雨(6 d)试验并进行数值模拟分析, 描述了黄土陡坡开裂过程和特征, 分析了坡体含水率和孔压响应, 并探讨了裂缝对陡坡稳定性的影响。结果表明: 边界隔离会导致连续降雨陡坡坡顶形成近乎横向贯通的裂缝, 基本消除了局部降雨以外土体的边界约束效应; 连续降雨后期陡坡开裂对坡体含水率及孔压分布产生较大影响, 最大含水率及孔压中心以裂缝为竖向对称轴下移, 并造成降雨结束 4 d 后水分总下渗深度为降雨期间的 1.3 倍; 连续降雨导致陡坡的安全系数降低了 58%, 而降雨结束 4 d 后陡坡的安全系数提升了 9%, 降雨期间边坡开裂极易引发陡坡上半部滑坡。研究结果可为黄土地区边坡的降雨灾害防治提供参考。

关 键 词: 边坡稳定性; 开裂破坏; 黄土陡坡; 隔离边界; 连续降雨

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)04-0077-10

滑坡是黄土地区主要的地质灾害, 降雨是诱发滑坡破坏的主要因素之一。据统计, 我国大陆所发生的大型灾害性滑坡约 50% 为降雨直接接触^[1]。降雨形成的水分入渗常常对边坡变形及稳定性造成不利影响^[2-3]。降雨条件下边坡局部开裂标志着坡体的滑裂面已逐渐发育, 是边坡降雨失稳的重要先兆^[4-5]。因此, 考虑降雨边坡开裂变形对边坡稳定性的影响, 开展黄土边坡连续降雨开裂试验并评价边坡的稳定性具有重要的理论和工程意义。

近年来, 一些学者开展了连续降雨对边坡影响的研究。张硕等^[6]研究发现短时连续降雨诱发的填方边坡变形具有浅部间歇性和突发性, 而长时连续降雨诱发的填方边坡变形则具有深部渐变连续性特点。Khan 等^[7]针对某高速公路边坡开展了试验研究, 结果表明软土边坡在较小雨量下便形成浅层滑坡。邹文华等^[8]根据数值模拟结果推测某高速公路边坡连续降雨失稳的时间及滑动面位置, 为该护坡工程提供了设计参考, 将连续降雨对边坡工程影响的研究成果成功应用于实际工程中。

部分学者通过室内模型试验和现场降雨试验研究了降雨对滑坡稳定性的影响。曾昌禄等^[9]研究表明不同雨强的水分入渗深度和入渗速率呈现与坡体部位相关的规律。林国财等^[10]分析得到水分入渗对砂土质边坡稳定性的影响具有延后性。林鸿州等^[11]依据降雨强度和持时等降雨特性建议了边坡失稳破坏的门槛累积雨量。丁勇^[12]开展的野外人工模拟降雨试验结果表明, 当累计降雨量达阈值后有可能诱发浅层黄土滑坡。

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12102379); 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLGY07-03); 陕西省教育厅科研项目(21JK0991)

作者简介: 王 磊(1985—), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士研究生, 主要从事黄土力学及边坡工程研究。

E-mail: 707960373@qq.com 通信作者: 李荣建(E-mail: lirongjian@xaut.edu.cn)

此外,裂缝的存在与发展对边坡稳定性的影响也备受关注。姚海林等^[13]开展了考虑裂隙和降雨入渗对膨胀土边坡稳定性影响的研究,认为考虑裂隙的降雨入渗可以成功模拟膨胀土滑坡的浅层性。Jamalinia 等^[14]通过弱化材料性能模拟了边坡裂缝,进而研究得到表层开裂对边坡安全系数影响巨大的结论。马鹏辉等^[15]的研究表明浅层土体含水量对降雨十分敏感,浅层裂缝对降雨入渗深度影响有限。Zhao 等^[16]将地震效应引入裂缝边坡稳定性分析中,研究表明地震效应对裂缝边坡的稳定性具有显著影响。张祥祥^[17]通过数值模拟方法研究了预置裂缝边坡的稳定性,研究结果表明边坡安全系数随裂隙深度的增加呈线性下降趋势。

降雨诱发滑坡形成机制的研究是一项非常复杂的工作,以上众多学者的研究成果均有力地推动了此项研究。然而,连续降雨对边坡稳定性具有不利影响,对其引发的边坡开裂及滑坡形成过程还未开展系统性研究,尤其是黄土高原广泛存在的陡峭边坡在连续降雨条件下的稳定性应得到科学评价。基于此,本文开展了黄土陡坡现场连续降雨试验及饱和-非饱和土陡坡的连续降雨数值模拟研究,总结陡坡土体响应及开裂特征并评价陡坡稳定性,为黄土地区边坡工程的失稳防治提供参考。

1 试验场地概况

吴起县位于陕西延安西北部,处于西北内陆高原,为中国黄土高原典型的梁状丘陵沟壑区,受东南季风影响较弱,是延安市的少雨中心。统计数据表明,吴起县平均年降水量仅为 478.3 mm,并且时空分布差异较大,主要表现为降水相对集中,7—9 月的降水总量约为 301.7 mm,约占全年降水量的 62% (图 1)。

本次降雨试验场地位于吴起县城东北方向约 25 km 的马连城村山顶坡地。坡面原本被茂密的杂草覆盖,为了消除植物根系对试验结果的影响,在试验场地采取机械清理与人工修坡相结合的方式去除表面草皮与浮土,清理厚度约 30 cm (图 2)。

试验场地边坡地层出露为第四系晚更新统马兰黄土,棕黄色,结构疏松,土体颗粒粒径较大,手搓滑腻感强,具有强烈湿陷性,坡体 4.5 m 深处存在少量粒径小于 2 cm 的钙质结核块体,边坡大部分土体为均质粉质黏土,通过室内试验获得边坡土体的物性指标如表 1 所示。

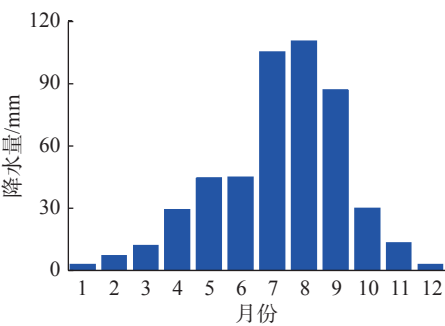
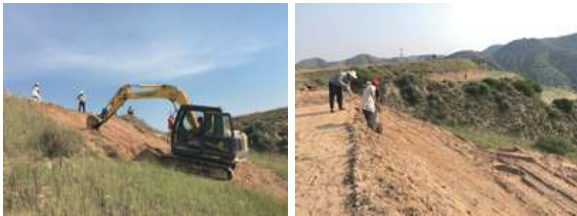


图 1 吴起县年际降雨量分布柱状图
Fig. 1 Annual rainfall distribution in Wuqi County



(a) 清理坡面 (b) 人工修坡

图 2 试验边坡修整

Fig. 2 Treatment of the steep loess slope

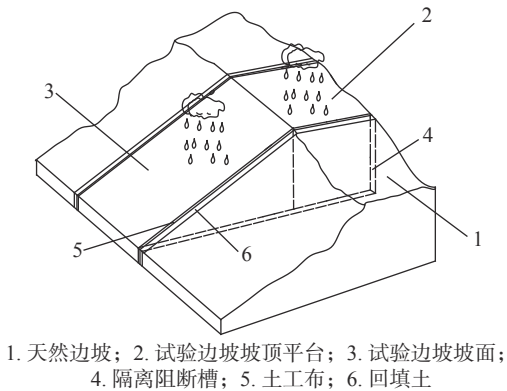
表 1 试验场地土的物性指标
Tab. 1 Physical property of soil at test site

天然含水率 / %	饱和度/%	干密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/kPa	液限/%	塑限/%	断裂能/(N·m ⁻¹)
8.93	25.51	1.32	5.32	26.43	16.42	3.84
压缩模量/MPa	渗透系数/(m·s ⁻¹)	湿陷系数	黏聚力/kPa		内摩擦角/°	
			天然	饱和	天然	饱和
18.05	5.72×10 ⁻⁶	0.11	16.315	9.050	26.62	23.93

2 降雨边界隔断方法与实施

人工模拟降雨现场试验中,在边坡表面全面实施降雨必然受到降雨技术及成本的制约。因此,研究者们均倾向于沿边坡纵向截取一定宽度(一般不超过4 m)进行降雨试验研究^[6,11-12],此时,边坡两侧降雨边界的约束效应使得边坡不可能处于严格的平面应变受力状态,因此对降雨条件下的各项参数响应等产生严重影响:一方面,引起降雨入渗过程中水分从测试边坡内部沿横向渗流至外部,令水分入渗响应失真;另一方面,引起测试边坡降雨边界处摩擦阻力增大,令边坡变形响应失真。水分侧向散失及边界处的摩擦阻力作用,均会导致边坡的降雨响应显著减弱,即这种三维约束作用造成边坡入渗特性、坡体变形及滑坡失稳等各项降雨响应偏于保守,若将这一结果作为工程加固设计等的参考,必然会引起加固强度不够等问题。因此,在人工模拟降雨现场试验中,合理设置边坡两侧降雨边界,对提高边坡现场降雨试验的准确性和可靠性意义重大。

本文采用自行研发的侧向隔离阻断边界技术(图3),在两侧降雨边界处既能阻隔横向渗透又可大大削弱侧向摩擦阻力,有效克服边界干扰问题,从而使边坡任意横截面均处于平面应变状态,边坡降雨试验的各项响应趋于真实。横向隔离阻断采用主要成分为聚乙烯的土工布。土工布具有表面光滑、材质柔软且延展性良好,以及质地密实且不透水的特点,在天然状态下并不影响边坡土体的受力性能,而在降雨条件下能同时起到隔渗和减阻的作用。现场试验中,实现这一边界条件的主要施工步骤为:人工开挖隔离阻断槽-沿降雨一侧边缘将土工布竖向平整铺设至预定深度-回填压实隔离阻断槽。为了避免在土体和土工布的接触部位出现界面流现象,严格按照每填筑约20 cm厚即夯击密实的分层填筑原则施工。



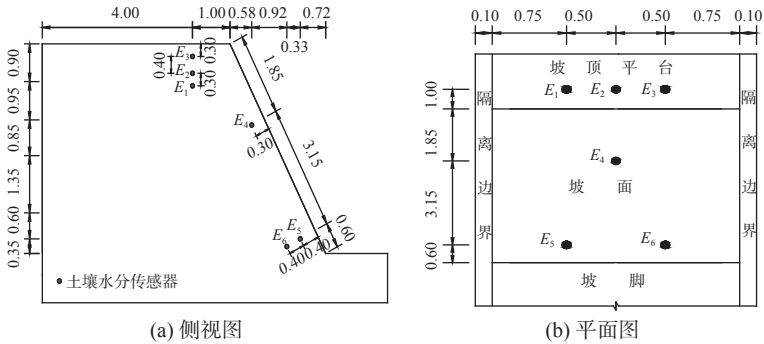
1. 天然边坡; 2. 试验边坡坡顶平台; 3. 试验边坡坡面; 4. 隔离阻断槽; 5. 土工布; 6. 回填土

图3 边坡隔离阻断边界技术示意

Fig. 3 Isolation and blocking boundary technology of slope

3 监测设备布设及降雨过程

试验边坡尺寸为坡顶长5 m,坡宽2.5 m,坡高5 m,两侧隔离阻断边界宽10 cm,边坡坡比为1:0.5,即坡度约63°。本次模拟降雨现场试验中,在坡顶、坡中及坡脚等部位共埋设6个土壤水分传感器,监测降雨期间及降雨结束后一段时间内边坡土体的含水率变化情况。土壤水分传感器布设见图4。



(a) 侧视图 (b) 平面图

图4 土壤水分传感器布置(单位:m)

Fig. 4 Diagram of moisture sensors and rainfall layout (unit: m)

拟在场地边坡开展连续暴雨条件下的试验研究,因此,以吴起县年际降水量为基础,参照中国气象局颁布的降水强度等级划分标准,设计持续时间为 6 d、降雨强度为 87 mm/d 的降雨参数。采用自行研制的降雨系统在隔离边界内侧坡顶及坡面实施全覆盖均匀降雨。降雨现场见图 5。

4 试验结果分析

4.1 测点体积含水率变化规律

整理坡体不同部位的水分传感器监测数据,得到 6 个测点体积含水率变化曲线(图 6)。由图 6 可知,坡体水分由浅入深的渗透规律与土体所在部位无关,只与土体深度有关。其次,连续暴雨导致坡体形成径流,坡面雨水入渗率相对坡顶较小,入渗速率稍慢,如埋深均为 0.3 m 的坡面测点 E_4 入渗速率低于坡顶 E_3 。另外,坡顶埋深 0.7 m 的测点 E_2 含水率的起始增长时间远远早于坡脚埋深 0.8 m 的测点 E_6 ,说明坡顶比坡脚有明显的垂直入渗优势。降雨结束后雨水继续缓慢下渗,测点含水率曲线在 6 d 后逐渐降低验证了这一点。

4.2 边坡开裂特征分析

降雨初期,由于表层土体含水量较低,水分入渗容许量较大,因此全部雨水快速入渗。降雨至 50 h 左右表层土体接近饱和状态,在陡坡表面形成明显积水,并于降雨第 60 h 左右发展为坡面径流。此后,连续降雨造成坡体表面少量剥皮流泥现象。直至降雨第 102 h,在距离坡肩 50 cm 左右的坡顶处,产生一条近乎垂直于降雨边界的微裂纹。随着降雨的持续,在第 122 h 时量测得到坡顶的微裂纹已发育为延伸至降雨边界两侧、宽度为 3 cm 的横向贯通裂缝,这一表征坡体在平面应变状态下的理想开裂形态得益于在两侧降雨边界处采用的兼具隔渗和减阻作用的土工布隔离槽。同时,在距离坡顶 0.3 及 1.8 m 左右的坡面处形成弧形塌落线。降雨结束时,裂缝前缘的土体已形成滑塌并倾向陡坡临空面,裂缝前、后缘的变形高差约 5 cm(图 7)。此外,坡顶隔离边界附近的裂缝发育过程见图 8,可以看出裂缝发育初期具有横向直线型发展趋势,降雨后期已开裂土体的临空优势推动了裂缝向坡面方向发展。

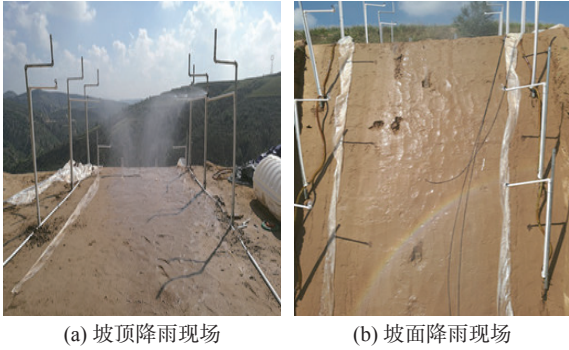


图 5 降雨现场
Fig. 5 Rainfall on site

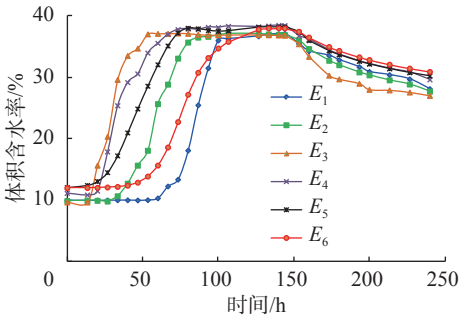


图 6 测点体积含水率变化曲线
Fig. 6 Water content curve at measuring point

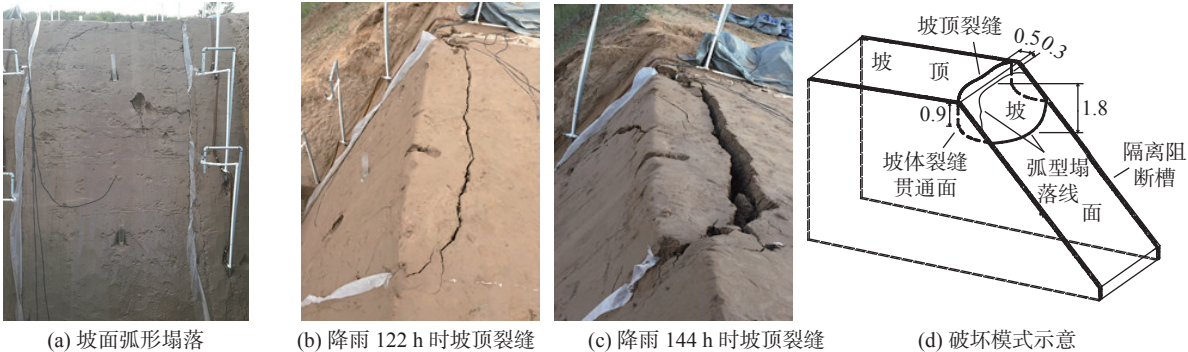


图 7 陡坡降雨开裂情况(单位: m)
Fig. 7 Steep loess slope cracking (unit: m)

试验陡坡在降雨初期呈非饱和状态,基质吸力较大,土颗粒的吸附力极强,加之土颗粒形成稳定的骨架结构,致使降雨前期的水分大都被吸附形成毛细水并聚集在土颗粒表面。随着雨水的入渗作用加剧,土颗粒表面形成大规模重力水,坡面积水由此产生。随着陡坡径流的出现,坡体内部的孔隙水压力迅速增大,依据饱和土的有效应力原理,土体的有效应力逐渐降低,当表层土体的水平向压应力趋于零时坡顶开裂。土体开裂后直至降雨结束,裂缝内部一直处于饱水状态,且开裂部位具有显著的临空面优势,这些因素导致裂纹进一步向下延伸,并愈加靠近坡面。降雨结束时,从陡坡正面观测发现坡面土体已累积产生较大剪切位移,并且裂缝前缘形成的独立土柱沉降明显,裂缝延伸至坡面及土体沉降变形共同促使陡坡形成滑体。坡顶的开裂线形态并非一般局部滑坡的“圈椅形”破裂包线,而是更接近直线,即这种破坏模式较为符合平面应变受力状态下的理想破坏形态,实施隔离阻断边界作用明显。连续降雨条件下黏性土的这种在坡顶起裂并延伸至坡面的破坏模式与相同条件下无黏性土的自坡脚向上渐次出现拉裂缝的破坏模式^[18]具有显著差异。

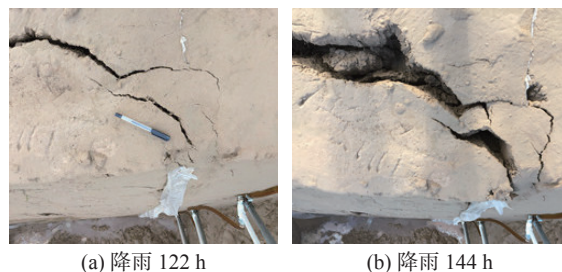


图8 坡顶左侧隔离边界附近细部裂缝发展过程

Fig. 8 Development of cracking near the isolated boundary

5 边坡降雨数值模拟及稳定性分析

为了更加全面地研究黄土陡坡在降雨条件下的渗流和稳定性变化特征,应用有限元软件 GeoStudio 中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块分别进行非饱和土体渗流分析及陡坡稳定性分析。模拟计算流程为:首先将地下水位及陡坡土体的渗流参数等输入到 SEEP/W 模块中进行陡坡稳态渗流分析,得到非饱和土边坡的初始渗流场;然后,将现场试验中的降雨参数及边界条件施加在具有初始渗流场的模型中,应用 SEEP/W 模块进行降雨入渗条件下的陡坡饱和-非饱和瞬态渗流分析,获得降雨条件下陡坡的瞬态渗流场;最后,将瞬态渗流场输入到 SLOPE/W 模块中计算降雨陡坡的安全系数。

5.1 计算模型及参数

计算模型的主要尺寸及监测点布设位置与现场试验相同(见图9)。从前文的分析可以看出,现场试验中沿坡顶发育横向贯通的竖向裂缝是降雨陡坡开裂破坏的主要特征。因此,本文开展的数值模拟分析,主要研究降雨条件下坡顶竖向裂缝的开展对边坡渗流场及应力场变化的影响。采取等效渗透系数法^[19]实现坡顶降雨裂缝模拟,即在设置土体材料属性时,赋予裂缝处的土体薄层单元远大于邻近土体的渗透属性,并令其自重为零。参照现场试验中边坡在降雨至122 h时形成横向贯通裂缝,假定边坡降雨数值模拟第122 h时坡顶出现横向贯通裂缝。根据前文绘制的边坡开裂破坏(图7)中竖向裂缝的位置及深度,在降雨入渗的第122 h至144 h降雨结束时刻,按照等效渗透系数法在坡顶设置距离坡肩线50 cm的宽3 cm、深1 m的裂缝。

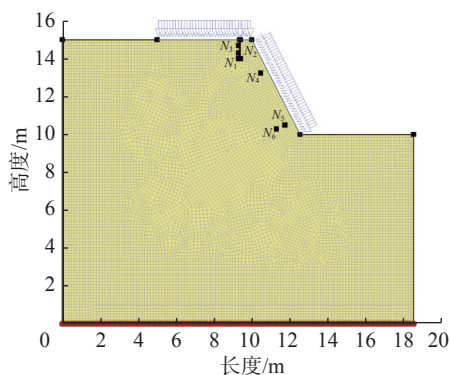


图9 陡坡模型边界条件及网格划分

Fig. 9 Boundary conditions and mesh of slope

采用 V-G 模型作为渗流计算的土-水特征曲线模型,表达式为:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \quad (1)$$

式中： θ_w 为体积含水率； θ_s 为饱和含水率，取 38.4%； θ_r 为残余含水率，取 2.7%； ψ 为负孔隙水压力； a 、 m 、 n 为曲线拟合参数，取值分别为 $a=12.92$ kPa、 $m=0.38$ 、 $n=1.68$ 。

渗透系数函数采用 V-G 方程估计得到，方程为：

$$k_w = k_s \frac{\left[1 - a\psi^{n-1} (1 + (a\psi^n)^{-m})\right]^2}{(1 + a\psi^n)^{m/2}}$$

(2)

式中： k_w 为渗透系数； k_s 为饱和渗透系数，取 5.72×10^{-6} m/s，裂缝处取 0.22 m/s；其他参数取值同上。

在计算陡坡安全系数时，采用 Fredlund 非饱和理论^[20] 计算土体抗剪强度，其非饱和土抗剪强度计算式为：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b$$

(3)

式中： c' 为有效黏聚力，取 6.8 kPa； φ' 为有效内摩擦角，取 24.45° ； φ^b 为吸力等效摩擦角，取 12° 。

根据试验场地位于山顶且地下水位较深的场地情况，结合坡体含水率沿深度逐渐增大的分布规律，将建立的陡坡模型坡底以下 10 m 处水平线设定为地下水位线，降雨强度与现场试验相同，且监测点(图 9 中点 12~17)位置与现场试验一致。对数值计算模型划分网格形成 10 220 个节点，10 050 个单元(见图 9)。

5.2 边坡土体含水量及孔压响应分析

通过有限元稳态分析得到陡坡模型的初始含水率分布如图 10(a) 所示，与现场取土测得的不同深度处土体的含水率较为吻合。图 10(b) 和图 10(c) 分别为降雨 6 d 结束时刻和雨后 4 d 的体积含水率等值线。

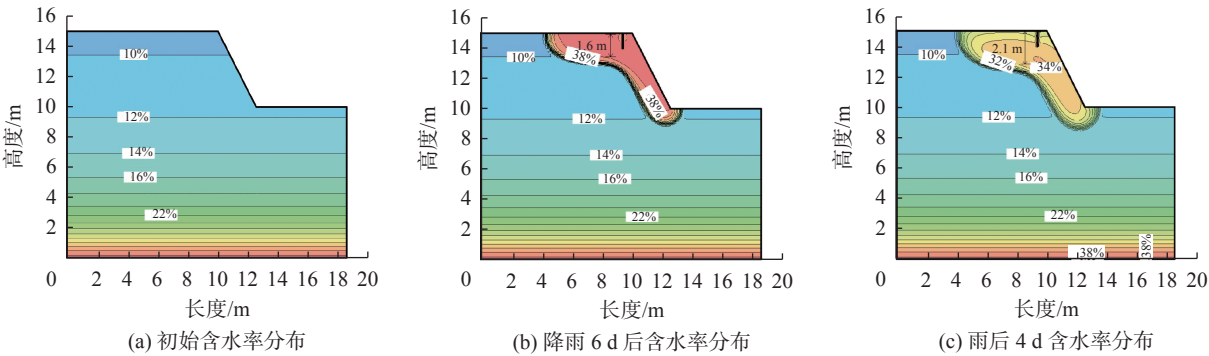


图 10 体积含水率等值线

Fig. 10 Contours of volumetric water content

分析图 10(b) 可知，降雨入渗导致坡顶深度约 1.6 m 范围内接近饱和状态，而坡面的入渗深度明显较小，并且水分渗流至非降雨区的距离比降雨区下渗深度小得多，这说明连续降雨条件下水分入渗深度在陡坡不同部位具有差异性且水平渗透距离有限。分析图 10(c) 可知，降雨结束后水分入渗深度增大，监测 4 d 结束时入渗深度约 2.1 m，为降雨结束时刻的 1.3 倍，此时降雨影响范围内的土体均处于较高含水率状态。对比图 10(b) 和图 10(c) 可以看出，降雨结束后裂缝周围土体便呈现非饱和状态，而之后裂缝内水分继续下渗导致坡体深部的最大含水量中心基本位于裂缝正下方，说明降雨期间的裂缝发育对陡坡的渗流场造成了较大影响。

图 11 为连续降雨条件下陡坡模型的体积含水率变化曲线。对比图 6 和图 11 可以看出，陡坡各测

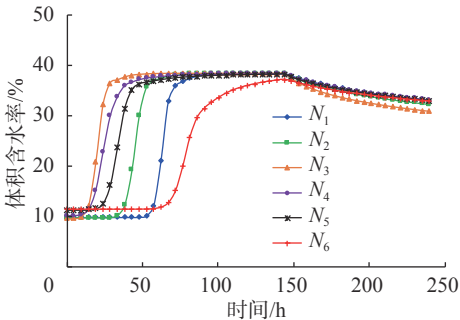


图 11 数值计算中测点体积含水率变化曲线

Fig. 11 Water content curve at measuring point in numerical calculation

点的含水率变化趋势在现场试验和数值模拟中基本保持一致。此外, 现场试验中测点 E_6 含水率开始变化的时间早于监测点 E_1 , 而数值模拟中监测点 N_1 稍早于监测点 N_6 , 这是由于两个监测点是从坡面同一部位斜向挖入坡体形成的, 而水分传感器埋入后土体回填的密实度不足导致水分较早入渗至监测点 E_6 。降雨结束后试验陡坡测点的体积含水率下降较快而数值模拟中下降缓慢, 这是因为在数值模拟中设置了固定不变的裂缝位置及尺寸, 而现场降雨条件下坡顶开裂会逐步加剧, 二者形成的渗流场存在一定差异。

图 12(a) 为陡坡土体初始孔压等值线, 图 12(b)和图 12(c) 分别为降雨 6 d 结束时刻和雨后 4 d 的孔隙水压力等值线。可见降雨结束时裂缝处的孔隙水压力比周围土体大, 且裂缝底部的孔压等值线呈下凸状。由雨后 4 d 得到的孔压等值线可以看出, 在降雨期间设置了具有一定深度的裂缝后, 陡坡深部土体的孔压也受其影响, 基本以裂缝以下某深度处为对称轴向周围消散。

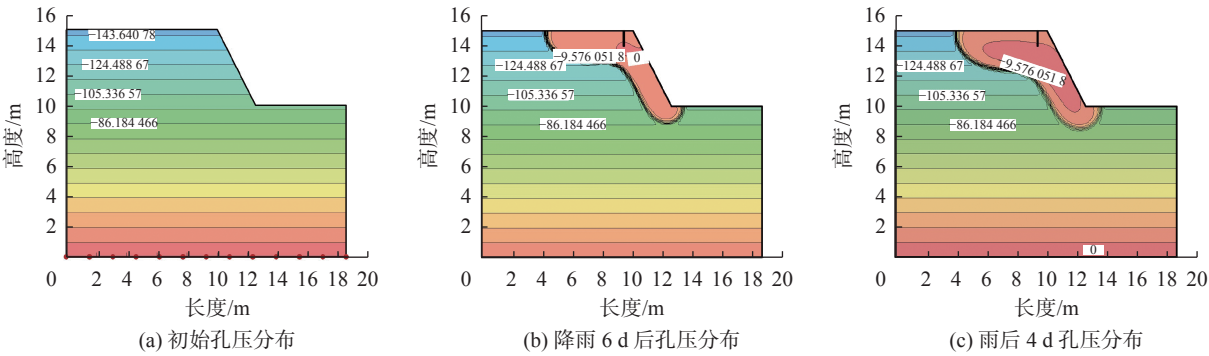


图 12 孔隙水压力等值线(单位: kPa)

Fig. 12 Contours of pore water pressure of slope (unit: kPa)

图 13 为测点孔隙水压力变化曲线。可见, 降雨期间各测点的孔压一旦开始变化便迅速增大, 这表明降雨导致陡坡浅层的渗流场发生剧烈变化。坡顶表层监测点 N_3 的孔隙水压力最先变化, 坡脚监测点 N_6 最后响应, 降雨 100 h 时各测点均接近饱和状态, 孔隙水压力趋于稳定, 而随着降雨结束后雨水继续下渗, 各测点的孔压呈小幅度回落态势。

综合分析连续降雨条件下陡坡数值模型的体积含水率和孔隙水压力分布规律, 黄土陡坡在降雨期间容易发育裂缝, 并且始终处于饱水状态的裂缝会对其深度范围内局部坡体的稳定性造成不利影响; 降雨结束后水分继续下渗, 坡顶裂缝的发展导致以裂缝以下一定深度处土体为中心, 在坡体深层形成局部高含水量区域, 对陡坡深部的稳定性造成不利影响。

5.3 降雨陡坡稳定性分析

依据上节降雨渗流分析形成的坡体应力场, 在 SLOPE/W 模块中输入试验场地土的强度参数, 计算得到降雨条件下陡坡的安全系数随时间的变化曲线(见图 14)。可以看出, 黄土陡坡的安全系数经历了

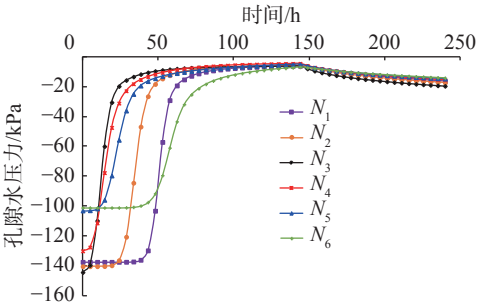


图 13 数值计算中测点孔隙水压力变化曲线

Fig. 13 Pore water pressure curve of slope at measuring point in numerical calculation

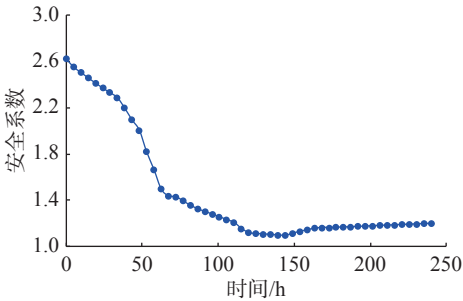


图 14 安全系数变化曲线

Fig. 14 Safety factor curve of slope

先急剧下降后缓慢上升的过程。黄土陡坡在初始状态的安全系数为 2.624, 具有较大的安全储备。降雨开始后 3 d 内陡坡的安全系数急剧下降, 连续降雨 6 d 结束时陡坡的安全系数为 1.095, 相对初始状态下降了 58%, 边坡此时处于欠稳定状态。降雨结束后, 陡坡的安全系数曲线表现为小幅度回升过程, 降雨结束 4 d 后安全系数缓慢回升至 1.198。

值得注意的是, 在降雨第 122 h 设置坡顶裂缝后, 陡坡的安全系数出现明显下降, 并很快达到安全系数的极小值, 这表明坡顶裂缝的发育加快了潜在滑动面的形成, 从而削弱了降雨陡坡的稳定性, 这与现场降雨试验中坡顶开裂之后经历较短时间便在坡体上半部产生滑塌的结果一致。降雨结束 4 d 后陡坡的安全系数虽然有小幅度回升, 但陡坡内部总体的安全储备并不大, 且水分持续下渗造成较深土体弱化, 有可能形成新的滑裂面从而引发深层滑塌。

6 结 语

(1) 连续降雨条件下水分由浅入深的渗透规律并不受土体所在部位的影响, 只与土体深度有关。连续降雨形成的坡顶裂缝导致降雨结束后水分继续下渗深度为降雨结束时的 1.3 倍。

(2) 降雨期间在坡顶形成近乎垂直降雨边界的横向贯通裂缝, 这表明采取土工布隔离边界措施能有效消除局部降雨边界以外土体的边界约束效应, 促使降雨陡坡的受力状态更加合理且参数响应更加准确。

(3) 数值模拟结果表明, 裂缝底部的体积含水率等值线和孔压等值线均呈下凸状, 并且降雨结束后坡体的最大含水率和孔压中心均位于裂缝的延伸线上, 这说明裂缝发育改变了陡坡的渗流场和孔压场。

(4) 陡坡的安全系数经历了先急剧下降后缓慢上升的过程, 连续降雨 6 d 导致陡坡的安全系数下降了 58%。坡顶裂缝对边坡的稳定性造成不利影响, 极易引发陡坡上半部滑塌。

参 考 文 献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454. (HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese))
- [2] COLLINS B D, ZNIDARCIC D. Stability analyses of rainfall induced landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 362-372.
- [3] 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.
- [4] 王刚, 孙萍, 吴礼舟, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡机理实验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1252-1263. (WANG Gang, SUN Ping, WU Lizhou, et al. Experimental study on mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1252-1263. (in Chinese))
- [5] WANG J D, XU Y J, MA Y, et al. Study on the deformation and failure modes of filling slope in loess filling engineering: a case study at a loess mountain airport[J]. Landslides, 2018, 15(12): 2423-2435.
- [6] 张硕, 裴向军, 黄润秋, 等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 32-41, 50. (ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 32-41, 50. (in Chinese))
- [7] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas[J]. Engineering Geology, 2017, 219: 118-129.
- [8] 邹文华, 刘辉, 邓小钊, 等. 连续强降雨工况土质边坡非饱和渗流及稳定性分析[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 11-15. (ZOU Wenhua, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Analysis of soil slope with unsaturated seepage and stability under continuous heavy rainfall condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 11-15. (in Chinese))

- [9] 曾昌禄,李荣建,关晓迪,等.不同雨强条件下黄土边坡降雨入渗特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊1): 111-115. (ZENG Changlu, LI Rongjian, GUAN Xiaodi, et al. Experimental study on rainfall infiltration characteristics of loess slopes under different rainfall intensities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Suppl1): 111-115. (in Chinese))
- [10] 林国财,谢兴华,阮怀宁,等.降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究[J].水利水运工程学报,2019(3): 95-102. (LIN Guocai, XIE Xinghua, RUAN Huaining, et al. Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 95-102. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 丁勇.人工降雨模拟作用下的黄土高边坡稳定性研究[D].西安:西北大学,2011. (DING Yong. Study on the stability of high loess slope under artificial rainfall simulation[D]. Xi'an: Northwest University, 2011. (in Chinese))
- [13] 姚海林,郑少河,陈守义.考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2001,23(5): 606-609. (YAO Hailin, ZHENG Shaohe, CHEN Shouyi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 606-609. (in Chinese))
- [14] JAMALINIA E, VARDON P J, STEELE-DUNNE S C. The impact of evaporation induced cracks and precipitation on temporal slope stability[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103506.
- [15] 马鹏辉,彭建兵,朱兴华,等.黄土浅层降雨入渗规律研究[J].水土保持通报,2017,37(4): 248-253. (MA Penghui, PENG Jianbing, ZHU Xinghua, et al. Regularities of rainfall infiltration in shallow loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 248-253. (in Chinese))
- [16] ZHAO L H, CHENG X, ZHANG Y B, et al. Stability analysis of seismic slopes with cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 77: 77-90.
- [17] 张祥祥.坡顶裂隙对黄土边坡稳定性多因素影响分析研究[D].西安:西安理工大学,2018. (ZHANG Xiangxiang. Study on the influence of slope top cracks on the stability of loess slope[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [18] 缪海波,柴少峰,王功辉.强降雨下无黏性土坡破坏的影响因素试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(2): 300-308. (MIAO Haibo, CHAI Shaofeng, WANG Gonghui. Influence factors for failure of cohesionless soil slopes triggered by heavy rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 300-308. (in Chinese))
- [19] 张宜虎.采用等效渗透系数法搜索渗流自由面[J].工程地质学报,2004,12(2): 187-192. (ZHANG Yihu. Using equivalent penetration coefficient method to search the unconfined flow surface[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 187-192. (in Chinese))
- [20] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. , 1993.

Stability evaluation and cracking research of steep loess slope under continuous rainfall

WANG Lei^{1,2}, LI Rongjian¹, LIU Junding¹, YANG Zhengwu³, SHI Jinfeng⁴

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Architectural Engineering Institute, Yan'an University, Yan'an 716000, China*; 3. *The IT Electronics Eleventh Design & Research Institute Scientific and Technological Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100, China*; 4. *Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China*)

Abstract: Slope instability caused by continuous rainfall is one of the common geological disasters of loess slope. In order to study the influence of continuous rainfall on the seepage field, deformation field and stability of steep loess slope, the isolation slot technology with lateral seepage isolation and longitudinal drag reduction was used to treat the rainfall boundary on both sides of slope. On this basis, the field continuous rainfall (6 days) test was carried out, along with numerical simulation analysis. The cracking failure process and characteristics were described, and the water content and pore water pressure response were analyzed. The influence was also discussed of the cracking on the stability of steep slope. The results show that the isolation boundary leads to transverse through crack almost on the top of the slope, which eliminates the boundary constraint effect of the soil outside the local rainfall range substantially. The slope cracking has great influence on the distribution of water content and pore water pressure in the later stage of rainfall, which causes the center of maximum water content and pore water pressure to move down with the crack as vertical symmetry axis gradually, and the total water infiltration depth is 1.3 times that of the rainfall period 4 days after rainfall. The safety factor is reduced by 58% due to continuous rainfall of the slope, while the safety factor increases by 9% after 4 days of rainfall. The slope cracking caused the upper part of the steep loess slope to collapse easily. The research results provide a reference for the prevention and control of rainfall disaster of slope in loess area.

Key words: stability of slope; cracking failure; steep loess slope; isolation boundary; continuous rainfall