

文章编号: 1007-2993(2022)04-0278-06

# 干-湿分明条件下降雨诱发滑坡演化过程模拟

周英博<sup>1</sup> 柴少波<sup>2</sup> 周秋鹏<sup>1</sup> 段志强<sup>1</sup> 王 进<sup>3</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北武汉 430077; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西西安 710064;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071)

**【摘要】** 降雨诱发的堆积体边坡地质灾害在我国南方地区极为常见, 揭示其失稳演化规律对我国山地丘陵地区的土质滑坡监测预警具有重要意义。基于鄂西地区降雨型滑坡的典型地质概化模型与降雨模型研究, 联合采用 Geo-Studio 软件的 Seep/W、Sigma/W 模块, 从渗流场、应力场及位移场等方面对降雨诱发滑坡的响应过程进行研究, 探讨了干湿分明情况下堆积体边坡失稳的演化过程。与未经历长期干旱的边坡相比, 经历长期干旱作用可以使得降雨向坡体更深入处入渗, 基质吸力变化范围更大, 降雨引起的坡内土体位移更大。且经历干旱条件时, 可明显看到沿着坡脚向上贯通且面积较大的塑性区分布, 边坡最终更有可能发生失稳破坏。研究成果在推动鄂西地区边坡滑坡地质灾害的防治理论发展方面具有积极作用。

**【关键词】** 堆积体边坡; 地质灾害; 滑坡; 降雨; 失稳机理

**【中图分类号】** P 642.22

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.04.004

## Simulation Analysis on the Evolution Process of Rainfall-induced Landslide Under Dry-wet Conditions

Zhou Yingbo<sup>1</sup> Chai Shaobo<sup>2</sup> Zhou Qiupeng<sup>1</sup> Duan Zhiqiang<sup>1</sup> Wang Jin<sup>3</sup>

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Wuhan 430077, Hubei, China;  
2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

**【Abstract】** The geological hazards of rainfall-induced accumulation slope are very common in south of China. It is of great theoretical and practical significance to reveal the law of instability evolution for the monitoring and early warning of soil landslide in mountainous and hilly areas of China. Based on the generalized model of typical geological landslides and rainfall model of rainfall induced landslide in western Hubei area, combined the Geo-Studio software, the evolution process of the slope destabilizing were discussed from the aspects of seepage field, stress field and displacement field of wet and dry conditions. Compared with the slope that has not experienced long-term drought, the long-term drought can make rainfall infiltrate deeper into the slope, the variation range of matrix suction is larger, and the soil displacement in the slope caused by rainfall is larger at the same time. Under drought conditions, it is obvious that the plastic zone with large area is distributed along the slope foot, and the slope is more likely to fail and fail eventually. The research results play a positive role in promoting the theoretical development of the prevention and control of landslide geological hazards in western Hubei province.

**【Key words】** deposit slope; geological hazard; landslide; rainfall; failure mechanism

### 0 引言

降雨作为滑坡的直接诱发因素, 其自身特征的差异会对滑坡的失稳破坏过程造成影响。目前, 众多学者主要从降雨强度、累积降雨量和降雨持续时间三个方面分别研究降雨特征的影响。Alonso 等<sup>[1]</sup>通

过稳定性计算研究了降雨强度与累积降雨量对滑坡的影响。刘建华等<sup>[2]</sup>、Chen 等<sup>[3]</sup>基于有限元法模拟了降雨入渗边坡的过程, 认为降雨强度和降雨持时对边坡稳定性影响最为显著。吴宏伟等<sup>[4]</sup>对香港典型土坡进行了二维有限元入渗模拟, 计算了降雨过程中

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41902277); 西安市科协青年人才托举计划项目(095920201327); 国网湖北省经济技术研究院科技项目(SGTYHT/18-JS-208)

**作者简介:** 周英博, 男, 1988 年生, 汉族, 博士, 工程师, 研究方向为电网地质灾害防护。E-mail: yingbozhou@126.com

**通讯作者:** 柴少波, 男, 1989 年生, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向为岩体工程稳定性分析。E-mail: shbchai@chd.edu.cn

安全系数的变化,研究了降雨强度和降雨持时的影响,发现基质吸力随降雨强度的增大下降越为明显;相同降雨时长条件下,边坡安全性随降雨强度增大而降低。降雨特征参数仅是对一次降雨事件的简化,一些学者通过对降雨历史资料的分析,提出了简化的降雨模型,并对不同降雨模型对滑坡的影响进行了研究。Ng 等<sup>[5]</sup>、Tsai 等<sup>[6]</sup>提出了降雨模型并应用于非饱和边坡降雨响应分析。邱战洪等<sup>[7]</sup>、张社荣等<sup>[8]</sup>采用数值模拟的方法研究了上述降雨模型作用下边坡的失稳过程,发现降雨雨型会对边坡孔压的时空演化、变形响应、安全系数等造成影响。范秋雁等<sup>[9]</sup>提出了连续降雨和湿-干循环两类降雨模式并进行了模型试验,研究了不同模式下边坡的变形情况。崔云等<sup>[10]</sup>对重庆黔江流水湾滑坡进行了分析,发现经历了数月的干旱少雨条件后,突发强降雨更易于激发滑坡,结果表明前期降雨对滑坡有一定的影响。巨昆仑等<sup>[11]</sup>通过模型试验手段,研究了长期干旱背景下降雨型松散堆积体滑坡机理。

目前,针对降雨特征对滑坡失稳影响的研究主要从降雨的单一参数入手,众所周知,降雨诱发滑坡不仅受到当日降雨的作用,还受到前期降雨的影响,是十分复杂的过程,仅靠对单一参数的影响研究不能很好地反映一次降雨的实际过程。本文在西南某地实际降雨资料分析的基础上,针对区域降水特点,建立了能够表达宏观降雨过程的降雨模型,并进行基于该模型的数值模拟分析,对干湿分明情况下降雨诱发滑坡的演化过程进行了对比研究。

### 1 滑坡地区降雨的特征及其相关性

调查发现降雨引发型滑坡是鄂西地区滑坡的主要类型。选取巴东、秭归两个地区进行统计分析,通过对两地在 2010—2014 年的逐日降雨量分析发现:这两个地区降雨较为集中,雨季(5—9 月)降雨量占全年总降雨量比重分别为 80% 以上和 75% 以上(见图 1)。上述结果说明该地区降雨主要集中在雨季,两地形成了干湿分明的降水分布规律。通过调研发现,研究区内滑坡崩塌在 5—8 月间发生最多,占总数的 52.33%。且灾害发生时间相比降雨时间具有一定的滞后性,绝大多数滑坡在前 9 日内都出现了 4 天以上的降雨。因此,可以判定滑坡的发生是前期降雨和当日降雨共同作用的结果,对鄂西地区干湿分明情况下滑坡演化过程的研究十分必要。

### 2 分析模型与降雨工况

鄂西地区滑坡地质灾害调查统计表明,灾害易发于堆积物较厚的区域,结构松散,以碎石土为主要

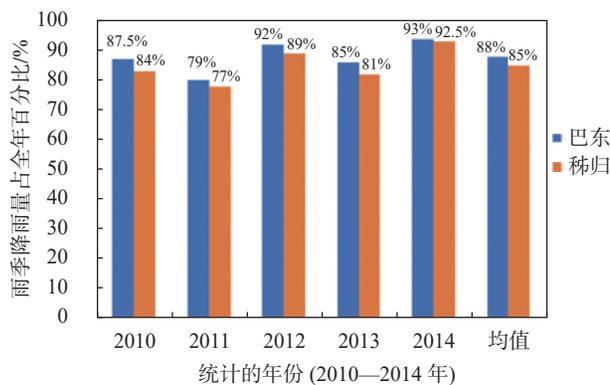


图1 雨季雨量占全年降雨量的比例

成分。根据该特点,建立了  $x$  方向的范围为 0 ~ 35 m,  $y$  方向的范围为 0 ~ 20 m,坡度为 45°,上部为碎石土,下部为基岩的数值模型(见图 2)。

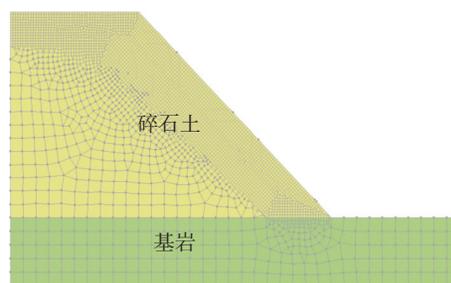


图2 堆积体边坡的概化模型

在土的强度特性中,碎石土和基岩的本构关系均采用理想弹塑性模型来描述,屈服准则均采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。碎石土是粉质黏土夹碎石,除了渗透性以外,其物理力学参数按照粉质黏土处理,这是因为碎石的存在增加了堆积黏土的渗透能力,使得碎石土的渗透性由低渗透性变为中等渗透性。经过对碎石土进行的直剪试验,获得了碎石土的天然重度为 19.8 kN/m<sup>3</sup>,天然状态下此类岩土体的黏聚力为 30 ~ 38 kPa,内摩擦角为 21° ~ 25°,取各参数的中间值作为碎石土的强度参数。弹性模量和泊松比可通过粉质黏土的经验参数获得。因为本次计算主要关心降雨对上覆碎石土的影响,故下覆基岩的力学参数取自岩体的经验参数,且在渗流计算中,将渗透系数设定为低渗透性,按饱和土考虑,在变形计算中,按照线弹性材料考虑。岩土体的物理力学参数见表 1。

模拟采用 Geo-Studio 软件,碎石土的土水特征曲线和渗透性函数曲线采用 Fredlund and Xing 模型进行拟合;上覆堆积体基质吸力初始值为 50 kPa。进行渗流分析时,坡体左右两边和底边为不透水边界,坡面为流量边界。此外,流量大小受降雨强度函数控制,降雨函数分为两阶段,共计 36 h,降雨 12 h,雨停 24 h,其中,前 12 h 的降雨强度为 0.005 m/h,累积降

雨量为 0.06 m, 与鄂西地区实测最大降雨强度 58.1 mm/d 保持一致(见图 3)。

表 1 模型参数表

材料	物理力学参数					流体力学参数
	重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 (kPa)	内摩 擦角( $^{\circ}$ )	弹模 (MPa)	泊松比	饱和和渗透 系数( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )
碎石土	20	35	23	10	0.3	0.05
基岩	23			10000	0.2	0.001

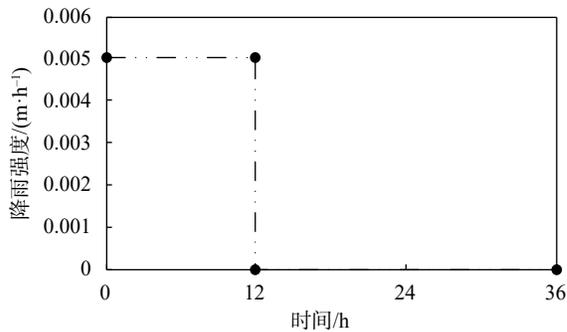


图 3 降雨时程曲线

分别对连续 15 日未受降雨作用土样和连续降雨 4 天后的土样进行基质吸力测定, 得到基质吸力的范围分别为 78~117 kPa 和 13~26 kPa。因此在模拟分析时将初始基质吸力设置为较高吸力值(100 kPa)来模拟边坡经过长期干旱作用后的状态, 设置较低吸力值(20 kPa)来模拟边坡经过未经历长期干旱作用后的状态。

### 3 渗流结果分析

经历长期干旱作用的滑坡在不同降雨持续条件下的渗流矢量变化见图 4。由图可见, 当降雨发生 1.2 h 时, 已经产生了指向坡内的渗流矢量。当降雨发生 12 h 时, 渗流区域随时间的发展不断扩大。当降雨发生 36 h 时, 渗流场有继续向坡体内部扩展的趋势。通过对同一时刻(24 h)不同初始条件下湿润锋处渗流矢量长度的对比见图 5, 经历干旱作用的坡体其矢量长度明显大于未经历干旱的情况。由此说明, 长期干旱作用可以使得降雨向坡体更深处入渗。

### 4 滑坡地区降雨的特征及其相关性

#### 4.1 基质吸力

经历长期干旱作用的滑坡在降雨过程及结束后基质吸力随时间的分布云图变化如图 6(a、b、c)所示。由图可见, 随着时间进行, 基质吸力影响区不断由表层向坡体内部扩展。同一时刻(36 h)不同初始条件下湿润锋处渗流矢量长度的对比见图 6(c、d), 可见湿润锋处的等值线密度存在较大差异。与未经历长期干旱的边坡相比, 经历长期干旱的边坡, 等值

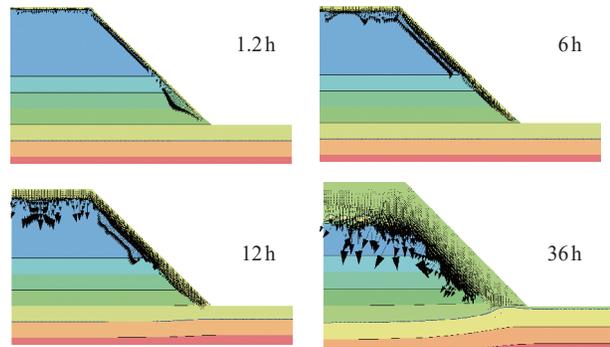


图 4 经历干旱作用边坡在不同降雨条件下的滑坡渗流矢量图

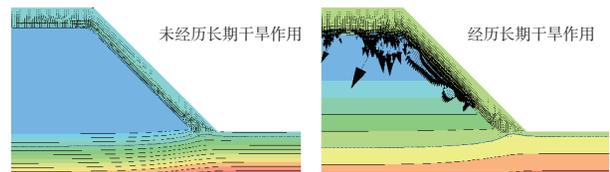


图 5 不同初始条件下降雨发生 24 h 滑坡渗流矢量图

线较密集, 说明初始吸力越大, 湿润锋处的基质势梯度越大。且基质吸力变化影响区域的范围明显更大, 湿润锋依然完整, 局部形成了一定范围的暂态饱和区, 存在继续扩展运移的可能。

在坡体的不同深度处设置一排监测点, 监测不同初始条件下坡体基质吸力的数值变化, 可获得不同深度基质吸力随时间的变化曲线(见图 7)。总体来说, 湿润锋会随时间而不断向坡内深入。未经历干旱条件下, 湿润锋在 7.2 h 时运移至 1 m 处, 在 24 h 时运移至 1.8 m 处, 在 36 h 时运移至 2.2 m 处; 经历干旱条件下, 湿润锋在 7.2 h 时运移至 1 m 处, 在 24 h 时运移至 2.2 m 处, 在 36 h 时运移至 3.8 m 处。对比发现, 经历长期干旱的边坡, 受降雨影响的基质吸力变化范围比未经历长期干旱的边坡的变化范围更大。

#### 4.2 剪应力

经历长期干旱作用的滑坡在降雨已开始(1.2 h)、降雨停止时(12 h)和降雨结束后(36 h)的剪应力分布如图 8(a、b、c)所示。由图可见, 随着时间进行, 坡面表层处的剪应力不断变大, 剪应力区域面积也达到一定范围。当降雨结束后(36 h), 受降雨停止, 雨水不再补给的影响, 表层剪应力绝对值的最大值有小幅下降。由于内部雨水运移, 坡体内中下部的剪应力仍有一定的提升, 坡脚处的应力集中区域随着时间的发展不断扩大, 导致应力集中程度较大。同时, 通过对同一时刻(36 h)不同初始条件下剪应力云图的对比如图 8(c、d)所示, 可以明显发现, 经历长期干旱作用的边坡, 在一定深度内形成了剪应力杂乱分布的圆弧

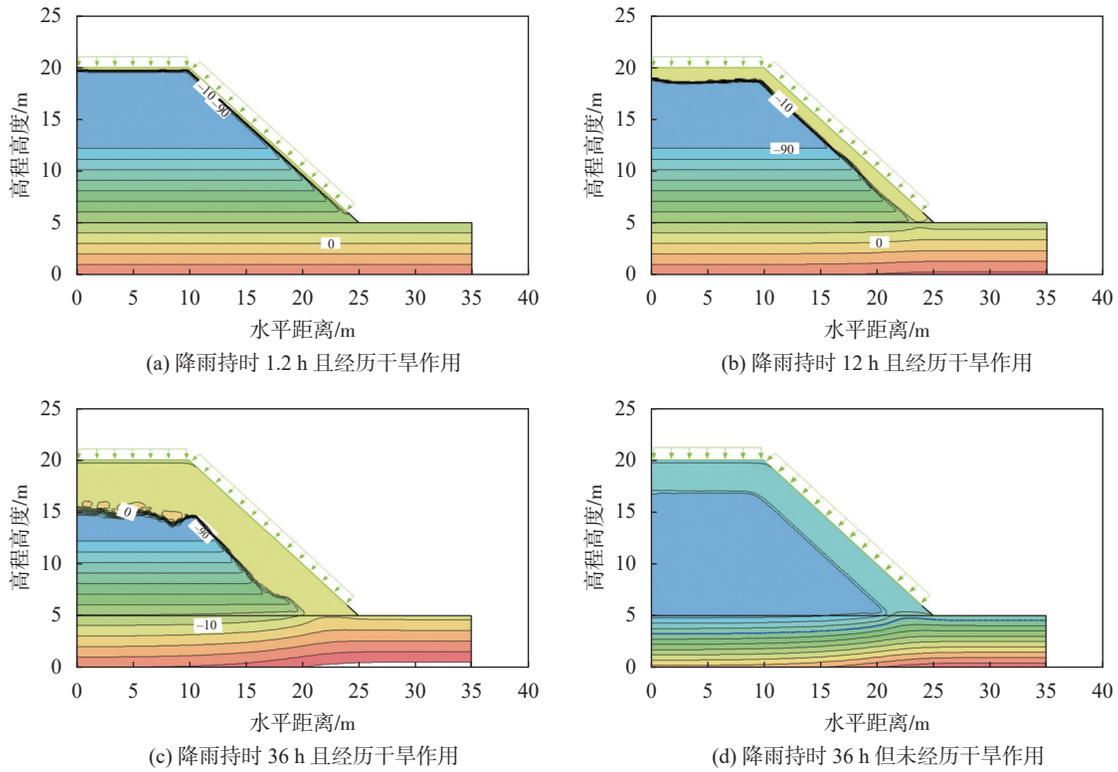


图6 不同条件下的部分基质吸力云图

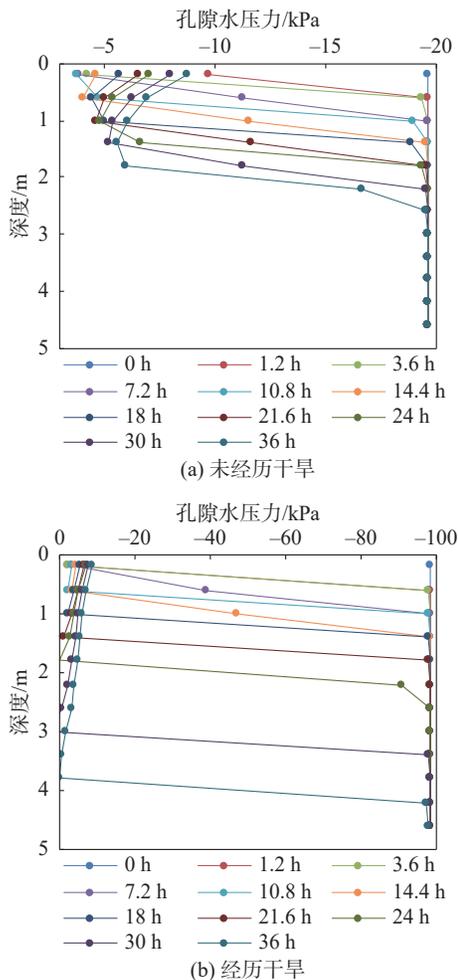


图7 不同深度基质吸力随时间的变化曲线

区域,这是边坡在降雨作用下应力重新调整,计算不收敛的结果,出现该现象时,可认为边坡已经出现了失稳破坏。而未经历长期干旱的边坡未出现该情况。

### 5 位移结果分析

#### 5.1 矢量位移云图及位移矢量

未经历长期干旱作用的滑坡在不同持时降雨作用下的位移场变化如图9(a、b、c)所示。由图可见,未经历长期干旱的边坡,在靠近坡顶的部位变形量不大,这是由于基质吸力的降低造成了边坡有效应力的降低,形成了垂直于地表的回弹变形。与此同时,坡脚处的位移矢量方向往水平方向偏转,有滑动失稳的趋势。通过对同一时刻(36 h)不同初始条件下位移云图的对比,如图9(c、d)所示,可以明显发现,经历长期干旱的边坡,位移场发生了更剧烈的变化,潜在滑体的位移矢量发生了明显的偏转,斜面上部由2点钟方向转向5点钟方向,坡脚部位的位移矢量由3点钟方向转向4点钟方向。印证了3.2节剪应力分析中边坡发生失稳的结论。

#### 5.2 位移监测值

通过在坡体前缘布设若干监测点,获得了不同初始条件在降雨作用下位移值,如图10所示。对比发现,经历长期干旱的边坡,同一时刻各个深度的位移比未经历长期干旱的边坡大,如12 h时,0.6 m处的位移值分别为0.001 m和0.005 m;36 h时,2 m处

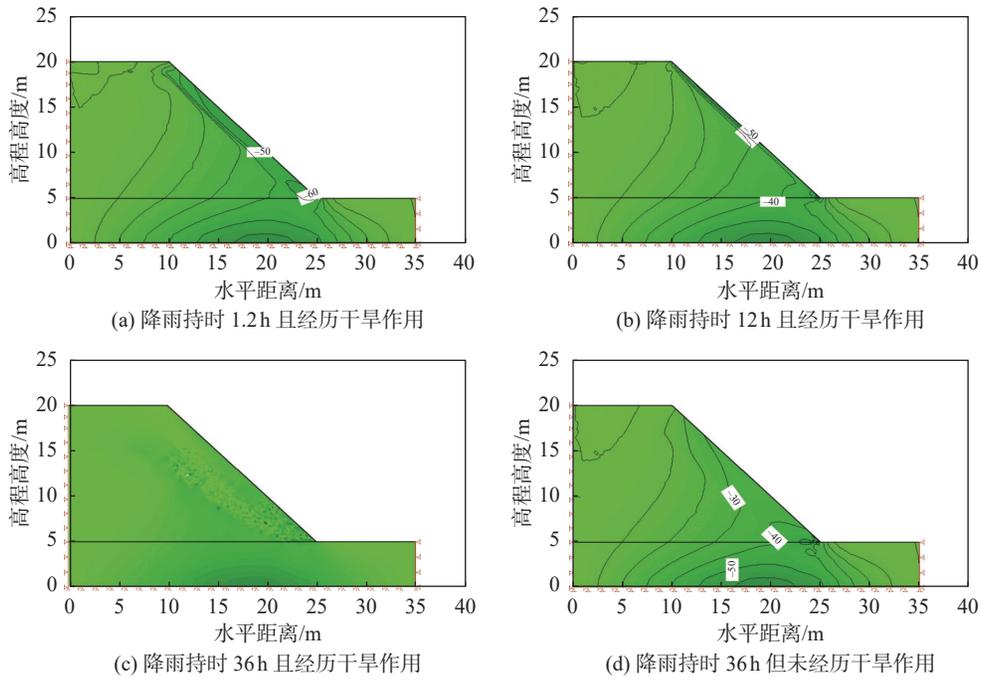


图8 不同条件下的部分剪应力分布图

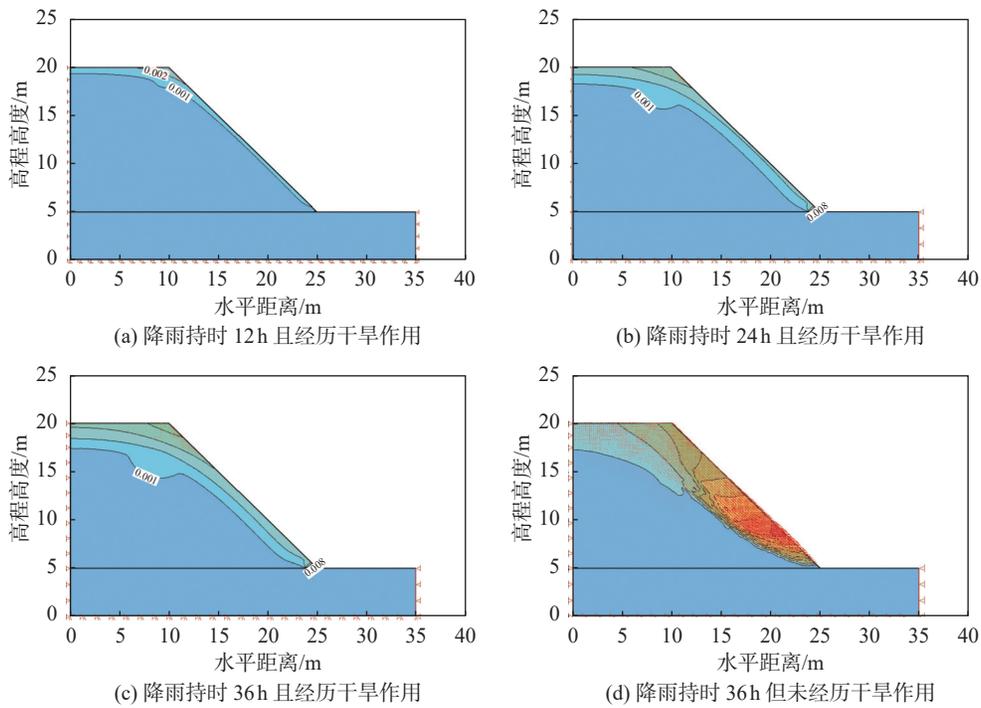


图9 不同条件下的部分矢量位移云图及位移矢量图

的位移值分别为 0.002 m 和 0.107 m。特别是经历长期干旱的边坡,在 24 h 和 36 h 时,边坡 3.2 m 深度范围内的土体产生了明显的位移,边坡已发生了失稳破坏。由此说明,初始基质吸力的增加加剧了降雨作用下的坡体变形。

### 5.3 塑性区

通过同一时刻(36 h)不同初始条件下塑性区的对比(见图 11),发现未经历干旱条件下的塑性区仅

仅在坡脚的部位有少量分布,而经历干旱条件时,可以明显看到沿着坡脚向上贯通且面积较大的塑性区分布。这说明未经历干旱条件下,边坡处于稳定或欠稳定状态,但并未失稳;经历干旱条件时,边坡最终发生了失稳破坏。

### 6 结论

(1)降雨作用下,渗流场范围由坡面逐步向坡内扩展;渗流场的速度峰值具有滞后性,可能出现在雨

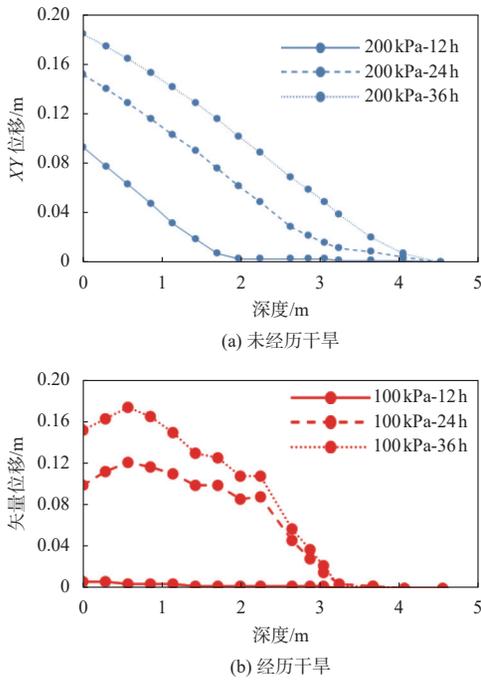


图 10 不同初始条件下降雨作用下边坡的位移曲线

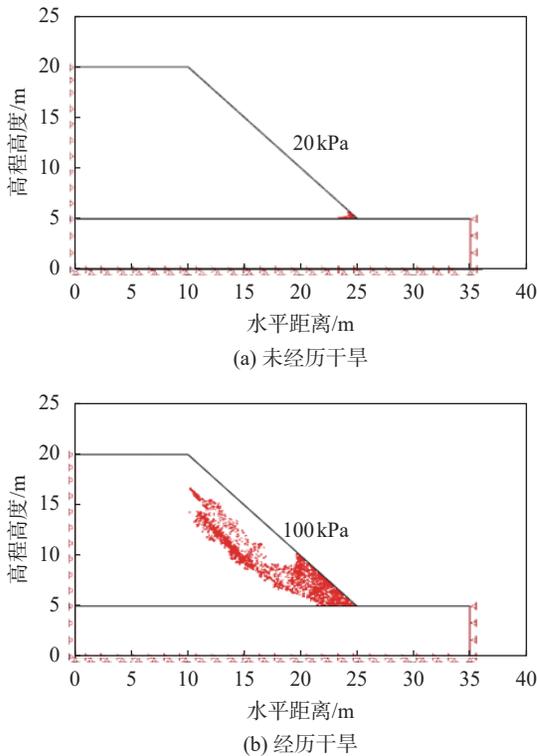


图 11 不同初始条件下降雨作用下塑性区的分布图(36 h)

停之后,且速度峰值随深度的增加而降低。

(2)降雨后坡内土体基质吸力的降低速率远大于雨停后基质吸力的恢复速率;降雨造成了坡内应力状

态的改变,随降雨持续,坡面和坡脚处的剪应力不断增加。

(3)前后缘的位移量在边坡失稳后突然增大,前缘早于后缘,滑动面深度:前缘浅,后缘深,具有牵引式破坏特征。

(4)降雨作用下,边坡塑性区从坡脚开始出现,降雨结束时,整个坡脚部位基本屈服,降雨结束后,塑性区仍然不断发展,最终贯通,形成滑坡。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] ALONSO E, GENS A, LLORET A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[J]. *Unsaturated Soils*, 1995, 1: 241-249.
- [ 2 ] 刘建华, 查旭东, 秦志斌. 降雨入渗对岩质边坡稳定性影响分析研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(11): 148-153.
- [ 3 ] CHEN R H, CHEN H P, CHEN K S, et al. Simulation of a slope failure induced by rainfall infiltration[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(5): 943-952.
- [ 4 ] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. *岩土力学*, 1999, (1): 2-15.
- [ 5 ] NG C W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(5): 1049-1062.
- [ 6 ] TSAI T. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide[J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(7): 1563-1569.
- [ 7 ] 邱战洪, 何春木, 朱兵见, 等. 不同降雨模式下山谷型垃圾填埋场水分运移及其稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 3151-3155.
- [ 8 ] 张社荣, 谭尧升, 王 超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [ 9 ] 范秋雁, 刘金泉, 杨典森, 等. 不同降雨模式下膨胀岩边坡模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3401-3409.
- [ 10 ] 崔 云, 孔纪名, 倪振强, 等. 强降雨在滑坡发育中的关键控制机理及典型实例分析[J]. *灾害学*, 2011, 26(3): 13-17.
- [ 11 ] 巨昆仑. 长期干旱背景下降雨型松散堆积体滑坡机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

收稿日期: 2021-03-30