

黄土浅层降雨入渗规律研究

马鹏辉^{1,2}, 彭建兵^{1,2}, 朱兴华^{1,2}, 同霄^{1,2}, 孟振江^{1,2}, 段钊^{1,2}

(1. 西部矿产资源与地质环境教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 探讨黄土浅层降雨入渗规律, 为研究降雨黄土滑坡机理提供理论参考。[方法] 以陕西省延安市大路沟滑坡为例, 在不同深度裂缝处与非裂缝处布置监测仪器, 结合数值模拟手段分析入渗规律。[结果] (1) 研究区浅层地表通过降雨入渗补给, 蒸发排泄。降雨对土体含水量的影响主要体现在土体含水量对降雨的响应时间和响应程度上, 存在一定的滞后性, 并且随着深度的增加滞后性越明显, 蒸发排泄对土体含水量的影响表现在土体的深度和受光面积上, 土体的深度越大, 土体体积含水量受到蒸发作用影响越小。(2) 黄土浅层土体含水量对降雨十分敏感, 当降雨量 <3 mm/d 时, 黄土浅层地表土体含水量基本不受降雨的影响, 当 3 mm/d $<$ 降雨量 <40 mm/d 时, 土体含水量随雨水的入渗而变化, 并且含水量的变化与降雨量大小成正相关。[结论] 由模拟不同工况下雨水入渗过程显示, 在雨水入渗过程中, 浅层裂缝对降雨入渗深度影响很小, 并且研究区黄土入渗深度有限。

关键词: 黄土滑坡; 降雨; 现场监测; 数值模拟; 入渗规律

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0248-06

中图分类号: P641.73

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.042; 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.042

Regularities of Rainfall Infiltration in Shallow Loess

MA Penghui^{1,2}, PENG Jianbing^{1,2}, ZHU Xinghua^{1,2},
TONG Xiao^{1,2}, MENG Zhenjiang^{1,2}, DUAN Zhao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] To explore the regularities of rainfall infiltration in shallow loess, and to provide reference for studying the mechanism of loess landslide caused by rainfall. [Methods] One monitoring site was set up in Dalu Ditch, Shaanxi Province by arranging the monitoring instrument both in cracks and no-cracks at different depths. The observed results were dealt with numerical simulation to analyze the regularities of rainfall infiltration. [Results] (1) Soil moisture was recharged by rainfall and was drained away through evaporation in the area. The main affect of rainfall on water content was the tempo-spatial responses to the rainfall. There had a hysteresis for temporal response, which was more obvious with the increase of the depth. The effect of evaporation on soil water content was influenced by the depth and the exposed area of soil. The greater the depth of soil was, the smaller the effect would be. (2) The soil water content was very sensitive to rainfall, e. g., when precipitation was less than 3 mm/d, the rainfall almost had no effects on the water content of soil, however, when precipitation was 3~40 mm/d, the rainfall was observed having positive effect on soil water content. [Conclusion] The infiltration process simulation under different conditions showed that the effect of crack was little, and also the infiltration depth of loess in study area was limited.

Keywords: loess landslide; rainfall; site monitoring; numerical simulation; regularities of infiltration

收稿日期: 2016-11-02

修回日期: 2016-12-17

资助项目: 国家基础科学(973) 发展计划项目“黄土重大灾害成灾机理及灾害链演化规律”(2014CB744702); 国家自然科学基金项目(41402255); 中央高校基本科研业务费(310826174001); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2017K010)

第一作者: 马鹏辉(1990—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士研究生, 研究方向为地质灾害及黄土灾害链。E-mail: spawnkobe@163.com。

中国黄土覆盖面积约 $6.30 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占中国陆地面积的 6.63%^[1], 黄土滑坡是黄土地区主要的地质灾害。据不完全统计, 截止 2004 年, 仅仅甘肃省发生黄土滑坡多达 4 576 处, 兰州 1 300 余处, 陕西省 1 131 处^[2]。由于黄土具有特殊的大孔隙结构和水敏性, 降雨成为了其最主要的诱发因素之一。张常亮等^[3]通过对延安市近 20 a 降雨量和发生黄土滑坡进行统计, 发现雨季发生的滑坡占全年 55.8%。徐张建等^[4]通过统计泾阳南源蒋刘滑坡群的发生时间与降雨关系发现, 1984 年降雨量丰富, 雨季长于往年, 导致著名的泾阳南源蒋刘滑坡群同年复活, 并且阐述了降雨黄土滑坡破坏机理: 降雨导致黄土土体含水量增加, 基质吸力减小, 抗剪强度减小, 稳定性降低进而失稳。正如范立民等^[5]提出: 由于黄土以粉质黏土为主, 垂直节理发育而且松散, 渗透性强, 雨水入渗下去, 经历一系列的物理化学反应, 原有土体的颗粒结构和化学成分发生变化, 土体强度减弱而发生滑坡。为了研究这类滑坡的发生机制, 很多学者做了现场入渗试验。研究^[6-9]表明, 黄土地区降雨入渗深度有限, 不会超过 4 m。武彩霞等^[10]通过在甘肃省黑方台现场灌溉试验和室内数值模拟, 得出黑方台黄土滑坡短期的灌溉并不能对地下水位形成有效的补给。而且王念秦与许领等^[2, 11]认为黄土表面在不完整的情况下, 降雨才会沿着裂缝或是落水洞等优势通道快速补给地下水, 坡面完整的情况下, 水运移是个漫长的过程, 并且具有阶段性。总体来说, 关于黄土中降雨入渗过程争议很多, 而且表面径流如何来补给地下水还是不明。为了了解降雨在黄土中的运移情况, 掌握降雨黄土滑坡的致灾机理, 本文以陕西省延安市大路沟滑坡为例, 在不同深度裂缝处与非裂缝处布置监测仪器, 结合数值模拟手段, 来探讨黄土对降雨的响应情况, 为研究降雨黄土滑坡机理提供一定的参考。

1 研究区概况

监测地位于陕西省吴起县, 地处西北黄土高原, 由于近代强烈的构造运动下, 区域经过多次的间歇性拱起, 形成了现在的典型黄土堆积地貌。区内海拔 1 233~1 809 m, 属于典型的半干旱温带大陆性季风气候。年均降雨量 478 mm, 降雨主要集中在 7—9 月, 年均气温 7.8℃, 昼夜温差比较大, 最低温度可达 -25.8℃, 最高温度可达 38.3℃。研究区境内出漏地层从老到新为白垩系华池组($K_1 h$)、新近系保德组($N_2 b$)、第四系地层(Q)^[12]。白垩系华池组($K_1 h$)主要出露于沟谷中, 多呈砂岩与泥岩互层, 棕红色。新

近系保德组($N_2 b$)在黄土之下, 岩性主要为红黏土, 呈深红色。第四系地层最下层为离石黄土, 红褐色, 结构较致密, 其上为古土壤, 暗红色, 含钙质结合和菌膜, 古土壤与离石黄土交替互层沉积, 上部为马兰黄土, 浅黄色、灰黄色, 孔隙、节理发育, 表面为现代黄土, 主要为植被层与耕作层^[13-14]。

2 监测场地及仪器布置

场地位于吴起县薛岔乡大路沟滑坡老滑坡坡体上, 滑坡后缘坐标: $36^{\circ}57'43.78''N$, $108^{\circ}28'35.79''E$ 。原 303 省道穿过大路沟滑坡, 后因省道改建工程开挖其坡脚, 同时受到连续降雨的影响, 大路沟滑坡于 2007 年复活, 发生了整体的滑动, 滑坡坡体上因耕作和变形破坏的原因, 现呈多级台阶, 各级台阶高差约 2~4 m。中下部进行了削坡处理, 开挖成 11 级台阶, 台阶高度、宽度不等, 纵坡度总体约 30° 。为了进一步了解降雨入渗规律, 在大路沟滑坡第 5 台阶上布置了监测仪器。此处出露 Q_2 离石黄土, 此处有一明显拉张裂缝, 裂缝与坡向夹角 55° , 可见深度 40 cm, 宽度 8 cm, 并且破坏了排水槽。监测内容包括: 土体体积含水量、裂缝处与非裂缝处土体含水量、天然降雨量(图 1)。裂缝处和无裂缝处各布置含水量传感器 3 个, 在埋仪器的过程中发现挖到 80 cm 的时候裂缝消失, 故把监测深度布置在 20, 40, 80 cm(图 1)。在附近安装漏斗式雨量计, 记录天然降雨量, 通过 GPRS 无线传输, 可以实时传输监测点数据^[15]。

3 监测结果分析

大路沟的监测数据是从 2012 年 8 月 25 日至 11 月 3 日, 共计 68 d, 对这个阶段监测数据来分析含水量变化和对降雨的响应特征。图 2 显示的是监测场地不同深度的含水量变化情况。观察裂缝处的土体含水量, 20 cm 处的含水量最低, 40 cm 处次之, 80 cm 处最高, 并且明显高于 20 与 40 cm, 基本处于饱和。一般来说, 在黄土中雨水主要是沿着裂缝下渗, 裂缝处的含水量都应该很高。但是因为监测仪器的监测频率为每 6 h 采集一次数据, 而降雨过程往往只有短短几个小时, 雨水沿裂缝下渗, 裂缝 20 与 40 cm 处的含水量会出现短暂升高现象, 而 20 与 40 cm 处不具有保存水的能力, 随着雨水入渗完毕, 因此 20 与 40 cm 处的含水量又会迅速降低, 故没有监测到 20 与 40 cm 处土体含水量短暂的突升现象, 监测到裂缝处 20 和 40 cm 的含水量较低。但是裂缝处 80 cm 的含水量一直处于较高状态, 这主要是因为, 该裂缝的深

度为 80 cm 左右,雨水迅速入渗到 80 cm 后开始汇集,雨水补给率超过了土体的渗透率,出现了雨水聚

焦效应,使得此处土体基本处于饱和状态。因此,在裂缝 80 cm 处的含水量会较高。

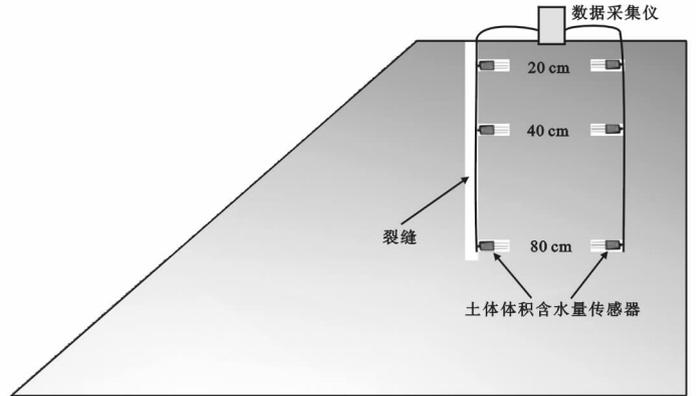
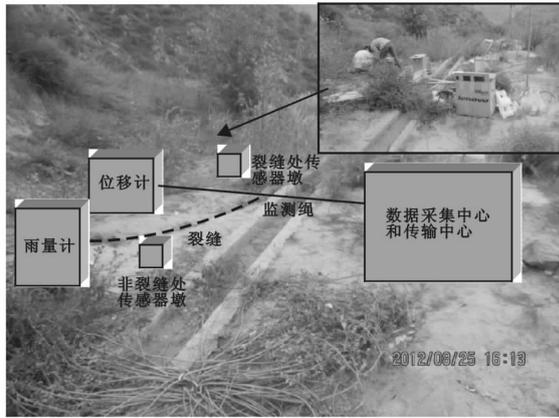


图 1 监测仪器和土体体积含水量传感器布设

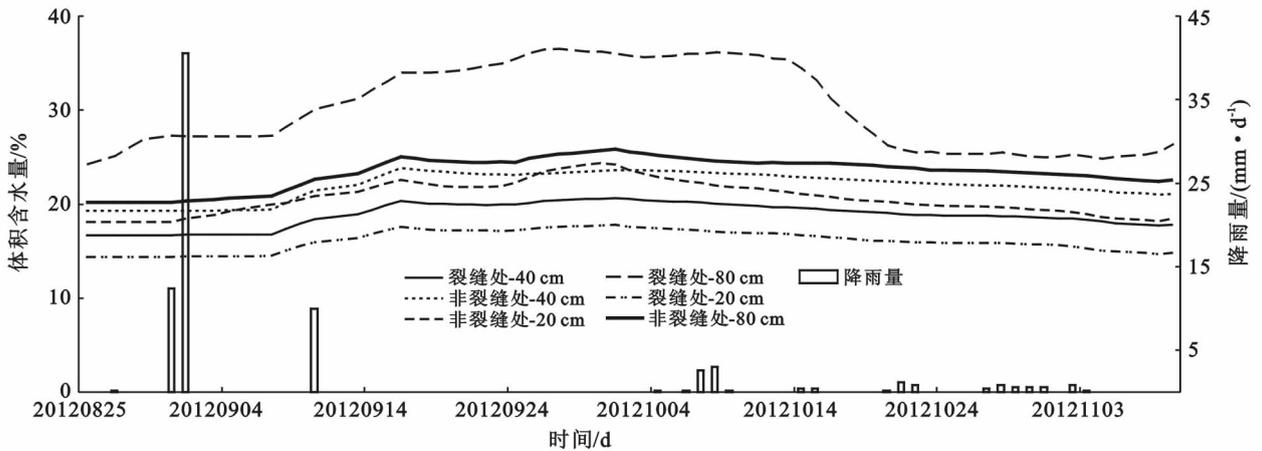


图 2 各监测点含水量与降雨的关系

非裂缝处的含水量 80 cm 处最高,其次是 40 cm 处,20 cm 处的含水量最低,并且不同深度的土体含水量变化不大,20 cm 处的土体含水量最低,这是因为在黄土高原地区,降雨主要沿裂缝入渗补给地下水,而地区属于半干旱地区,海拔较高,蒸发作用很大,黄土表层含水量会比下部较低。

降雨对含水量的影响主要体现在,土体含水量对降雨入渗的响应时间和响应程度上。从图 2 可以看出,监测时间内,一共出现了 6 次降雨,前两次降雨量较大,第一次降雨量最大,为 53 mm,不同深度的含水量响应时间和程度具有明显不同,无裂缝处 20 cm 的含水量响应最为敏感,降雨后,该处含水量随之增加,而其他位置处的含水量响应欠敏感,但是在过了几天后其他监测处土体含水量开始迅速增加,裂缝 80 cm 处增加幅度最大。第二次降雨后(10 mm),不同深度的含水量都有迅速响应,并出现急剧升高状态,此后各处含水量开始逐渐衰减,但是只有裂缝处 80 cm 的

含水量保持升高状态,并且含水量较高。在经过 30 多天后,该处的含水量才出现衰减,且衰减速率较大。总体来看,各处含水量对降雨都有响应,但是响应情况则不同,降雨后,土体 20 cm 处含水量会响应较为敏感,其他位置会在随后的几天内开始响应,有一定的渗流响应滞后性。如图 2 所示,比较相同深度裂缝与非裂缝处的土体含水量,在降雨中非裂缝 20 和 40 cm 处的土体含水量要比裂缝 20 和 40 cm 处低 2% 左右,而在 80 cm 处裂缝土体含水量要比非裂缝处高 10% 左右。这因为土体在裂缝处较非裂缝处蒸发面积大,导致相同深度裂缝处体积含水量比非裂缝处体积含水量大。

4 降雨入渗模拟

4.1 非饱和渗流的控制方程

Richards 在 1931 年提出达西定律同样可以应用到非饱和带水的运动,不考虑介质的体积变化量,同

时,在非饱和的流动中,水的密度变化不计,Richards 非饱和流基本微分方程^[16]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $K_x(\theta)$ —— x 方向的渗透系数; $K_y(\theta)$ —— y 方向的渗透系数; $K_z(\theta)$ —— z 方向的渗透系数; h ——总水头; θ_w ——体积含水率; t ——时间。

由公式(3)得一维非饱和流基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (2)$$

4.2 土水特征曲线 θ_w 与渗透系数函数 $K(\theta)$ 的确定

本文取自大路沟滑坡的 Q_2 离石黄土,采用滤纸法测定不同含水量下非饱和和原状土的基质吸力。Van Genuchten^[17] 总结出了非饱和土体体积含水量与基质吸力之间的关系式:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (3)$$

式中: θ ——非饱和土体积含水量; θ_s ——饱和土体体积含水量,取值 0.445; θ_r ——土体残余含水量,取值 0.042; a, n ——拟合参数。

对试验数据进行 Van Genuchten 模型拟合,得到 $a=16.477\ 59, n=1.463\ 43$ 。

在室内进行原状土渗透试验,测得土体垂直向渗透渗透系数:0.184 03 m/d,同时结合以上结果,利用 Van Genuchten^[17] 提出了统计传导模型(4),来确定土体非饱和渗透系数,结果详见表 1。

$$K_r(\psi) = \frac{[-(\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (4)$$

式中: $K_r(\psi)$ ——基质吸力为 ψ 的渗透系数与饱和渗透系数的比。

表 1 黄土基质吸力及所对应的渗透系数

渗透系数 K	不同基质吸力/kPa							
	8.86×10^{-2}	2.64×10^{-1}	2.34×10^0	6.95×10^0	2.07×10^1	6.16×10^1	1.83×10^2	5.46×10^2
$K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	1.63×10^{-1}	1.42×10^{-1}	7.00×10^{-2}	2.70×10^{-2}	4.18×10^{-3}	2.49×10^{-4}	9.44×10^{-6}	3.15×10^{-7}

4.3 入渗模拟

黄土垂直裂缝发育,大型黄土滑坡普遍认为是降雨通过裂缝集中流入地下导致地下水位上升或是形成上层滞水而发生^[18],为了符合实际情况,模型大小选择和实际情况一致,坡高 6 m,坡底宽 7 m,坡顶宽 4 m,设置模型坡顶和坡面为降雨渗流边界,左边界和下边界为不透水边界,土层特性为 Q_2 离石黄土(图 3)。

—158 kPa,特设定 8 种工况(表 2),通过改变裂缝大小和数量来模拟,其他条件不变,依据已经监测到的降雨量,进行降雨渗流模拟。

表 2 8 种模拟工况裂缝参数

工况	裂缝数量/个	裂缝宽度/cm	裂缝长度/cm
1	0	0	0
2	1	8	80
3	2	8	80
4	3	8	80 </td
5	1	8	120
6	1	8	160
7	1	16	80
8	1	24	80

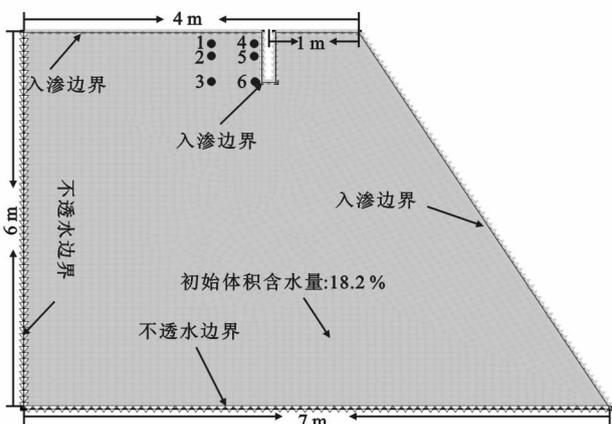


图 3 工况 2 数值模型图

模拟前需要初始化,土层初始体积含水量为 18.2%,由拟合出的 VG 模型,求得初始基质吸力为

图 4 显示的是与实际情况对应的工况 2 的入渗结果,非裂缝处含水量取点分别为 1,2,3,裂缝处为 4,5,6(图 3),可以看出与实际监测数据趋势基本一致,降雨对土体含水量的影响主要体现在土体含水量对降雨入渗的响应时间和响应程度上,并且存在滞后性,并且随着深度的增加滞后性越明显。在对比中发现实际监测数据体积含水量与土体深度的变化成正相关,而模拟结果恰恰相反,计算中虽然采用的是实地黄土的相关物理特性参数,但是在模拟中未考虑蒸

发因素,而土体水分蒸发是一种主要的能量交换过程,尤其在黄土高原地区,基本属于半干旱地区,海拔

相对较高,温差大^[19-21],可以看出蒸发严重影响着研究区黄土浅层土体含水量变化。

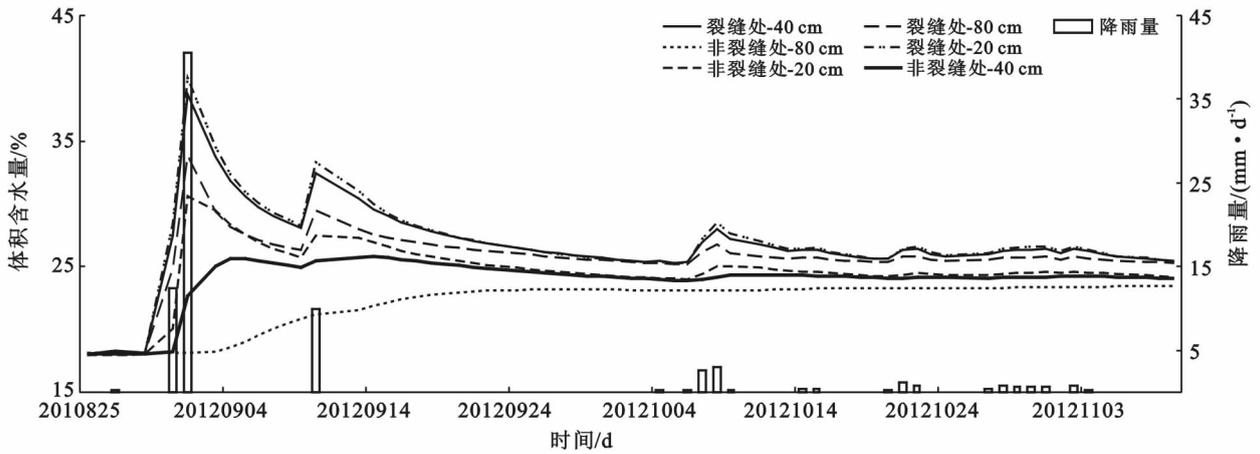


图 4 工况 2 不同深度土体含水量

图 5 显示的是第 1 次降雨以后土体的孔隙水压力变化云图,裂缝的大小与数量的变化,只是导致了裂缝局部的水压力变化,基本没影响整体土体的变化,而且从图 5 中可以看出雨水的入渗很有限,都是 1 m 以内的土体水压力发生变化,而在 1 m 以下的土层水压力基本没有变化,说明大路沟滑坡 Q₂ 离石黄土表层降雨入渗深度受到浅层裂缝影响很小,并且入渗深度很有限。黄土地区裂缝在入渗中起着优势通道的作用,引起地下水位抬升而诱发大量的黄土滑

坡^[22-23],结合数值模拟结果我们可以从新来理解黄土优势通道,其作用是有阶段性的:(1)裂缝属于地表裂缝,并且深度没有延伸到滞水层或是渗透性极低的古土壤层,此时裂缝在整个入渗过程中对深部土体含水量的影响很小,无法起到优势作用,对边坡稳定性基本没影响;(2)当裂缝贯入滞水层或是渗透性极低的古土壤层时,此时裂缝在入渗过程中就会起到优势通道的作用,水通过裂缝迅速入渗并富积,软化、泥化土体,致使黄土滑坡发生。

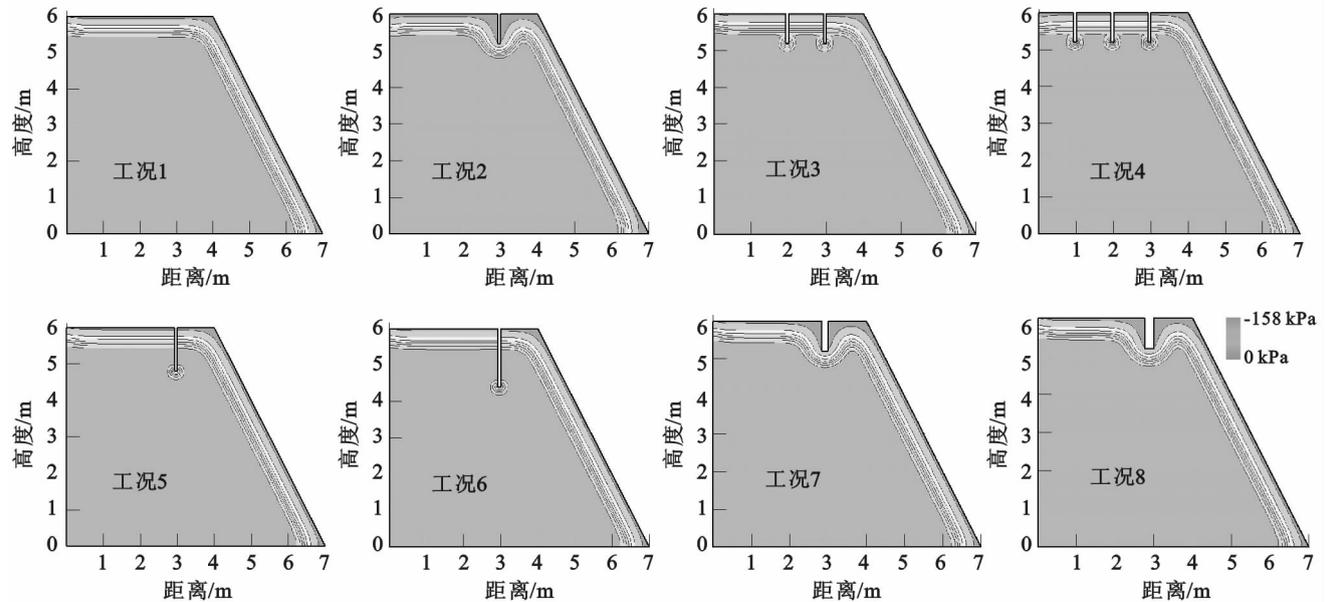


图 5 不同工况下第一次降雨后孔隙水压力分布

5 结论

(1) 黄土浅层土体含水量对降雨十分敏感,当降

雨量 < 3 mm/d 时,黄土浅层地表土体含水量基本不受降雨的影响,当 3 < 降雨量 < 40 mm/d 时,土体含水量因雨水的入渗而变化,并且含水量的变化与降雨

量成正相关。

(2) 研究区浅层地表通过降雨入渗补给,蒸发排泄,降雨对土体含水量的影响主要体现在土体含水量对降雨入渗的响应时间和响应程度上,并且存在滞后性,并且随着深度的增加滞后性越明显。蒸发排泄对土体含水量的影响表现在土体的深度和受光面积上,土体的深度越大,土体体积含水量受到蒸发作用越小,而对于裂缝处与非裂缝处,裂缝处受光面积大于非裂缝处,相同深度下裂缝处土体含水量小于非裂缝处。

(3) 模拟了不同工况下雨水入渗过程,显示地表浅层裂缝对降雨入渗影响很小,并且大路沟滑坡黄土入渗深度有限。

[参 考 文 献]

- [1] 孙建中. 黄土学[M]. 香港:香港考古学会,2005.
- [2] 王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 甘肃 兰州:兰州大学出版社,2005.
- [3] Zhang Changliang, Zhang Yaguo, Li Tonglu, et al. In-situ observation research on the regularities of water migration in loess[J]. *Water Resource and Environmental Protection*, 2011, 34(5):2745-2748.
- [4] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7):1297-1312.
- [5] 范立民,岳明,冉广庆. 泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J]. *中国煤田地质*, 2004, 16(5):37-39, 46.
- [6] 丁勇. 人工降雨模拟作用下的黄土高边坡稳定性研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2011.
- [7] Tu Xingbing, Kwong A K L, Dai Fuchu, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2):134-150.
- [8] 刘海松,倪万魁,杨泓全,等. 黄土路基降雨入渗现场试验[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1):60-63.
- [9] 李萍,李同录,付昱凯,等. 非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2014, 45(10):3551-3560.
- [10] 武彩霞,戴福初,闵弘,等. 台塬顶裂缝对黄土斜坡水文响应的影响[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2011, 41(5):1512-1519.
- [11] 许领,李宏杰,吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2):32-35.
- [12] 胡江洋. 巨厚层黄土滑坡形成机理及综合处治方案优选研究[D]. 陕西 西安:长安大学,2009.
- [13] 李明. 吴起大路沟滑坡治理方案优选研究[D]. 陕西 西安:长安大学,2008.
- [14] 白宇. 吴起县大路沟特大型黄土滑坡治理设计优化研究[D]. 陕西 西安:西安科技大学,2014.
- [15] 庄建琦,马鹏辉. 一种降雨诱发滑坡灾害监测系统:中国, CN203812391U[P]. 2014. 09. 03.
- [16] 吴吉春等. 地下水水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社. 2009.
- [17] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(44):892-898.
- [18] 李萍,李同录,王阿丹,等. 黄土中水分迁移规律现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5):1331-1339.
- [19] 张常亮,李萍,李同录,等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(6):728-734.
- [20] 欧阳斌强,唐朝生,王德银,等. 土体水分蒸发研究进展[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3):625-636, 654.
- [21] 贾莲莲,王小江. 黄土高原水面蒸发量初步估算[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3):143-145.
- [22] Zhou Yuefeng, Tham L G, Yan R W M, et al. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration [J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 55(2):330-341.
- [23] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4):530-540.