黄土地区降雨的优势入渗深度

同 霄[1], 彭建兵[1,2], 朱兴华[1], 马鹏辉[1]
(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: [目的] 分析黄土地区降雨入渗深度,为研究黄土滑坡破坏机理提供依据。[方法] 通过现场观测实验监测不同深度土体的含水量变化趋势,并基于颗粒离散元方法对降雨入渗过程进行数值计算。[结果] 监测结果表明黄土地区降雨入渗深度不超过 1.5 m。进一步通过数值计算发现:优势通道入渗的深度和裂缝几何尺寸有关,裂缝越深、越宽,降雨入渗的深度越大,影响范围越广,且裂缝的几何形态随着降雨入渗过程的发展而发生变化。[结论] 黄土降雨入渗分为非饱和入渗和优势通道入渗 2 种,非饱和入渗深度有限,优势通道入渗深度更大,易诱发大规模滑坡灾害。

关键词: 黄土; 降雨入渗; 降雨监测; 优势渗流通道; 颗粒流
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2017)03-0231-06 **中图分类号**: P642, P208

文献参数: 同霄, 彭建兵, 朱兴华, 等. 黄土地区降雨的优势入渗深度[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 231-236. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.039; Tong Xiao, Peng Jianbing, Zhu Xinghua, et al. Advantage infiltration depth of rainfall in loess area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 231-236. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.039

Advantage Infiltration Depth of Rainfall in Loess Area

TONG Xiao[1], PENG Jianbing[1,2], ZHU Xinghua[1], MA Penghui[1]
(1. *College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] The depth of rainfall infiltration in loess region was analyzed in order to provide the basis for studying the mechanism of loess landslide. [Methods] The variations of soil water content at different depths were monitored by field observation, and the numerical simulation of rainfall infiltration process was carried out based on the particle discrete element method. [Results] The monitoring results showed that the depth of rainfall infiltration in loess area was less than 1.5 m. Numerical calculation found that the dominant channel infiltration depth is related to the geometry of the cracks, the deeper or the wider of the cracks, the deeper and wider of the rainfall infiltration. Besides, the cracks had different geometry characteristics in the process of rainfall infiltration. [Conclusion] The rainfall infiltration in loess can be divided into 2 types: unsaturated infiltration and dominant channel infiltration. The depth of unsaturated infiltration is limited, but the penetration depth of the dominant channel is comparatively larger that can potentially induce large-scale landslide disaster.

Keywords: **loess; rainfall infiltration; rainfall monitoring; preponderance flow path; particle flow**

近年来,由于气候条件的变化,黄土地区降雨表现出季节性集中分布的特征,诱发了大量的黄土滑坡。降雨在时间上的集中性决定了滑坡发生时间的集中性。课题组统计了 2003—2014 年期间,甘肃省和陕西省的滑坡灾害新闻报道,从结果中可以看出滑坡主要发生在 6—8 月,期间发生的滑坡数为 12 和 34 例,约占 12 a 间滑坡总数的 68.4% 和 80.9%,这一阶段正是降雨量集中的月份。天然状态下黄土具有特殊性结构和高胶结强度,能够产生高抗剪强度来抵抗滑坡发生;而随着降雨入渗,降雨影响范围内的土体饱和度增大,基质吸力减小,抗剪强度降低,最终使得斜坡在下滑力增大,抗滑力减小的双重不利作用

收稿日期: 2016-09-21 **修回日期**: 2016-10-20
资助项目: 国家重点基础研究发展计划"黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论"(2014cb744702)
第一作者: 同霄(1987—),男(汉族),陕西省三原县人,博士研究生,研究方向为地质灾害。E-mail: tong@chd.edu.cn。

下失稳破坏。因此研究黄土降雨入渗影响深度是分析滑坡稳定性和研究破坏机理的基础。

目前对降雨入渗深度的研究有 2 种方法,一是降雨后现场观测,二是人工模拟降雨入渗试验。张茂省等[1]在陕北观察到断断续续 10 d 多降雨后,疏松的马兰黄土浸湿深度仅为 1 m。涂新斌等[2]通过人工降雨试验得出:当雨强达到 40 mm/24h 时,下渗前峰不超过 2 m,而达到 120 mm/24h 时,不超过 3 m;刘海松等[3]通过人工降雨试验提出降雨影响深度不超过 2.7 m;李萍等[4]在甘肃省正宁县建立监测站进行全年观测,结果表明只有 1.2 m 内的土壤水分受降雨和蒸发影响较大。由此可以看出,虽然不同的现场观测或者人工降雨试验其黄土土性、黄土地形、降雨持续时间和强度以及观测方法、监测仪器均有所不同,但是总的研究规律表明降雨直接入渗的深度是有限的,不能对地下水位产生显著影响。

当降雨入渗深度较小时,只能诱发浅表层的小规模滑坡,而大型的黄土滑坡,一般认为是降雨通过优势渗流通道流入地下,导致地下水位局部上升或形成上层滞水引起。根据洛川黄土塬现场入渗试验和室内试验可以看出,野外实测的黄土渗透系数 K 值是室内试验的十几倍,这是因为室内试验得到的 K 值不可能反应宏观的黄土节理的导水作用[5-6]。黄土中的优势渗流通道包括黄土节理、拉张裂缝和落水洞等。黄土节理是黄土中的破裂缝隙,在黄土地层中发育极为普遍,特别是垂直节理更为普遍,构成黄土的主要特征之一,降雨可沿着垂直节理由地表向土体深部迁移。当地面在降雨入渗侵蚀过程中形成落水洞,连续落水洞贯通后继续发育为裂缝,或者由于斜坡边缘卸荷作用使节理局部张开形成拉张裂缝,均成为地表水下渗的有利通道。因此,一些大型滑坡后缘常有串珠状落水洞,最后裂缝贯通,形成错台,以致滑动[7-9]。

综合课题组野外调查、现场观测、数值计算,并综合众多学者的研究成果,认为黄土降雨入渗包括 2 种,一种为非饱和入渗过程,该过程非常缓慢,长期积累会对黄土深部土体产生影响,另一种为优势通道入渗,为快速下渗过程,可迅速改变黄土深部含水量。本文拟通过现场观测实验,监测不同深度的土体含水量的变化过程,并利用颗粒流数值方法对降雨入渗过程进行分析,为研究黄土地区降雨入渗深度和优势渗流通道的快速下渗机理提供依据。

1 野外观测试验

1.1 监测平台简介

本研究在西安市临潼区南骊山附近进行现场观测试验,共布置 5 个不同深度的土体含水量监测点,分别距离地表为 0.2,0.5,1.0,1.5 和 2.0 m,同时设置 1 台雨量计来记录降雨强度。每 1 h 自动读取数据,完成无线传输记录。本文选取 2014 年 4 月 1 日至 2014 年 5 月 31 日,共 61 d 的监测数据(如图 1 所示)。

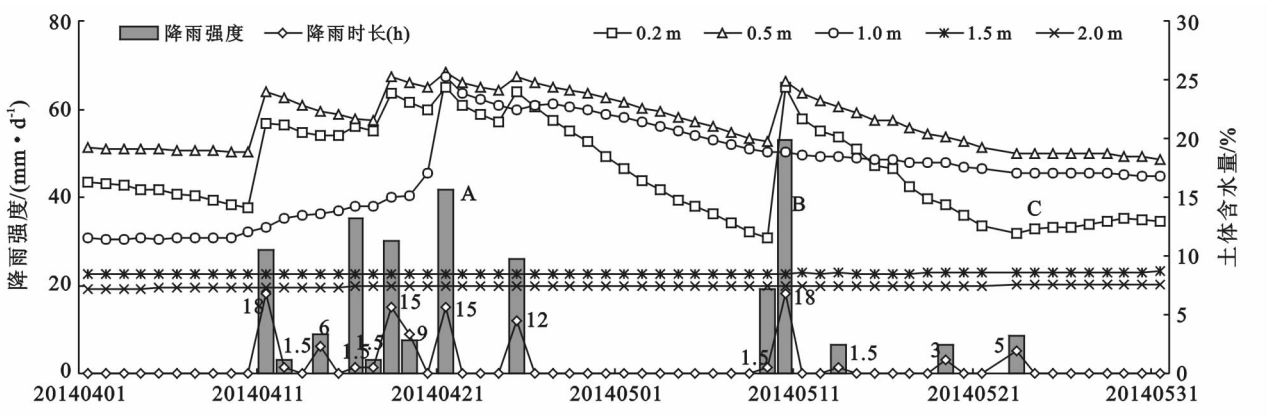


图 1 降雨强度、降雨时长和土体含水量的监测曲线

1.2 监测数据

根据中国气象部门的降雨等级的分类标准,小雨 24 h 内降雨量<10 mm,中雨 24 h 内降雨量为 10~24.9 mm,大雨 24 小时内降雨量为 25~49.9 mm,暴雨 24 小时降雨量 50~100 mm,大暴雨 24 h 降雨量大于 100 mm。在监测的 61 d 内,共经历了 14 次降雨,其中小雨 7 次,中雨 2 次,大雨 4 次,暴雨 1 次,可分为 3 个集中降雨阶段,如图 1 中的 A,B,C 所示。

4 月 1 日至 4 月 10 日,10 d 内无降雨发生,0.2 m含水量小幅度波动,0.5 m 以下的含水量保持平衡。A 阶段为 4 月 11 日至 4 月 25 日,15 d 内有 9 次降雨。当发生降雨后,0.2 和 0.5 m 的含水量随之增加,1.0 m 含水量对降雨的响应滞后,增加趋势稍慢,1.5 和 2.0 m 处含水量基本稳定,没有发生变化。

从 4 月 26 日至 5 月 8 日,该阶段 13 d 内无降雨发生,0.2 m 的含水量快速降低,0.5 和 1.0 m 的含水量缓慢降低。B 阶段为 5 月 9 日至 5 月 13 日,5 d 发生 3 次降雨,0.2 和 0.5 m 含水量随着降雨的发生迅速增大,1.0 m 含水量稍有滞后并缓慢增大,1.5 和 2.0 m 处含水量基本稳定。C 阶段为 5 月 14 日至 5 月 31 日,18 d 内发生 2 次降雨,均为小雨,且降雨时长较短,只有 0.2 m 处含水率稍有波动,其他深度含水率变化不大。

观察土体含水量的监测曲线可以看出,0.2 m 处含水量的变化幅度较大,降雨时迅速增大,降雨结束后含水量随之降低,0.5 m 变化幅度比 0.2 m 处的稍弱,1.0 m 处含水量在降雨发生后,会滞后缓慢增加,并在降雨结束后缓慢降低,且短时间、低强度的降雨对 1.0 m 处土体含水量影响较微弱。

在监测的 61 d 内,0.2、0.5 和 1.0 m 深度的土体含水量在降雨发生时会随之增大,降雨的发生和含水量的增大有较好的对应关系,但是 1.5 和 2.0 m 处土体含水量变化幅度很小,61 d 内,1.5 m 处土体含水量最小为 8.4%,最大为 8.7%,平均变化幅度为 0.34%,2.0 m 处土体含水量最小为 7.2%,最大为 7.6%,平均变化幅度为 0.53%,具体监测结果如表 1 所示。现场观测试验在 2 m 内共布置 5 个不同的深度,所以不能精确的得到降雨入渗的深度,但是通过观测试验可以发现,在 1.5 m 处土体含水量的变化幅度已经非常小,所以可以确定在该黄土地区,降雨入渗的深度不超过 1.5 m,这与其他学者的研究成果一致[10]。这说明黄土降雨入渗的深度是有限的,为了进一步研究降雨入渗的深度,本文利用颗粒流对降雨入渗过程进行数值计算。

表 1　不同深度土体含水量检测观测结果

深度/m	最小含水量/%	最大含水量/%	平均变化幅度/%
0.2	11.5	24.4	52.9
0.5	18.2	25.7	29.2
1.0	11.4	25.2	54.8
1.5	8.4	8.7	0.34
2.0	7.2	7.6	0.53

2　降雨入渗数值计算

2.1　颗粒流数值方法简介

1971 年 Cundall 提出离散元法,最早应用于岩石力学问题,随后在 1979 年 Cundall 和 Strack 将其应用于土的研究。颗粒流作为离散元的一种,专门用于模拟固体力学的大变形问题,它通过球形单元模拟颗粒的运动及相互作用,由空间的平动运动方程与转动运动方程确定任意时刻颗粒的位置与速度。作为研究颗粒特性的工具,可以采用具有代表性的多个颗粒单元,通过数值模拟试验得到颗粒的本构模型。颗粒流数值方法是从介质的基本粒子结构的角度考虑介质的基本力学特性,并认为给定介质在不同应力条件下的基本特性主要取决于粒子之间接触状态的变化,适用研究粒状集合体的破裂和破裂发展问题、以及颗粒的流动(大位移)问题[11-12]。目前在国内外已被广泛应用于各研究领域。解决静态问题也可解决动态问题,既可用于参数预测,也可用于在原始资料详细情况下的实际模拟,模拟试验可以代替室内试验[13]。

2.2　数值计算模型

模型箱尺寸为 3 m×5 m,黄土尺寸为 3 m×3 m,模拟暴雨情况,所以降水量设为 100 mm/24h,即雨滴模型高度为 0.1 m。数值计算模型分为 2 个部分,黄土模型与雨滴模型。在颗粒离散元方法中,模型是由不同大小的颗粒组合构成的,模型的变形、破坏等力学性质是由颗粒本身的参数和颗粒之间的接触参数这 2 类共同确定的。对于颗粒本身而言,有 2 个需要确定的参数:颗粒的半径(m)和颗粒的密度(kg/m^3)粒的半径越小时,和实际物质的尺寸越接近,计算结果越真实;颗粒的密度通过土工试验可以确定。黄土以粗粉粒为主体,构成黄土的骨架,颗粒直径为 0.01～0.05 mm[14]。数值分析中,考虑计算机运算能力,将实际土颗粒直径放大 1 000 倍。理想致密黄土模型颗粒直径取 0.05 m,其他模型颗粒直径在 0.01～0.05 m 这一范围内服从高斯分布。黄土的土颗粒密度为 2 540～2 840 kg/m^3,数值计算选取 2 700 kg/m^3。含裂缝的黄土模型中,在黄土中央布设裂缝 1 条,宽 0.5 m,深度 1.0 m。颗粒的刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力,是材料或结构弹性变形难易程度的表征。在数值计算中颗粒为刚体不能变形,所以取值较大,若取值较小时,颗粒和颗粒之间会发生重叠。颗粒之间的接触有 3 种较常用的接触模型来表征,刚度接触模型、滑动模型和黏结模型。其中接触黏结模型常用于模拟孔隙大、较松散材料,平行黏结模型常模拟孔隙小、致密的材料[15],由于黄土具有疏松、大孔隙等特征,所以本文对黄土的研究选取接触黏结模型。黏结强度的参数分为法向和切向 2 种,需要通过室内试验和数值试验进行标定,本文通过室内直剪试验得到的剪应力和应变曲线,在数值直剪试验中进行多次标定,最终得到代表黄土的黏

结强度参数如表 2 所示。根据多次试算结果来看雨滴直径取为土颗粒直径的 1/10 较为合理，半径为 0.005 m。水只能承受一定的法向力，法向刚度设为 300 Pa，切向刚度设为 1 Pa，黏结强度设为 1 N。雨滴降落时，因受到重力作用而逐渐加速，同时空气对其产生的摩擦阻力也随着增大，此外还有浮力。所以本文为了缩短计算时间，直接对雨滴施加垂直向下的初始速度 9.3 m/s[16] 来模拟雨滴由高空中降落至地面的过程。数值计算过程中忽略雨水的蒸发，观察不同模型中雨滴颗粒的入渗过程。

表 2 黄土模型参数

模 型	密度/(kg·m^{-3})	颗粒直径/m	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	法向黏结强度/kN	切向黏结强度/kN
理想致密模型	2 700	0.05	1.0	1.0	5 000	3 000
大孔隙模型	2 700	0.01～0.05	1.0	1.0	5 000	3 000
存在裂缝模型	2 700	0.01～0.05	1.0	1.0	5 000	3 000

2.3 数值计算结果

理想致密模型中黄土颗粒是规则紧密排列的，颗粒间孔隙很小，降雨入渗过程中，水颗粒入渗阻力大，没有渗流的空间。数值计算结果表明理想致密模型降雨下渗的深度为 0.3 m，水颗粒大部分集中在地表之上，只有少量的水颗粒在重力的作用下穿过黄土颗粒与颗粒之间的接触下渗到土体下部。随着下渗深度的增加，水颗粒下渗到深部土体中的数量在慢慢减小，逐渐消失。对于大孔隙黄土模型降雨入渗的计算结果，提取初始状态、中间状态和稳定状态 3 个阶段进行研究。随着水颗粒以初始速度降落在地表后，入渗也随之开始。如图 2 所示，水颗粒在重力作用下，向下部土体迁移，入渗初期水颗粒迁移速度快，随着入渗深度的增加，迁移速度变小。当达到稳定状态时，测得浸润深度为 1.3 m，即大孔隙黄土模型中降雨入渗的影响深度为 1.3 m。可以看出基于颗粒流数值方法建立雨滴模型和黄土颗粒模型研究黄土中降雨入渗过程的方法是可行的，数值计算的结果与实际结果吻合。

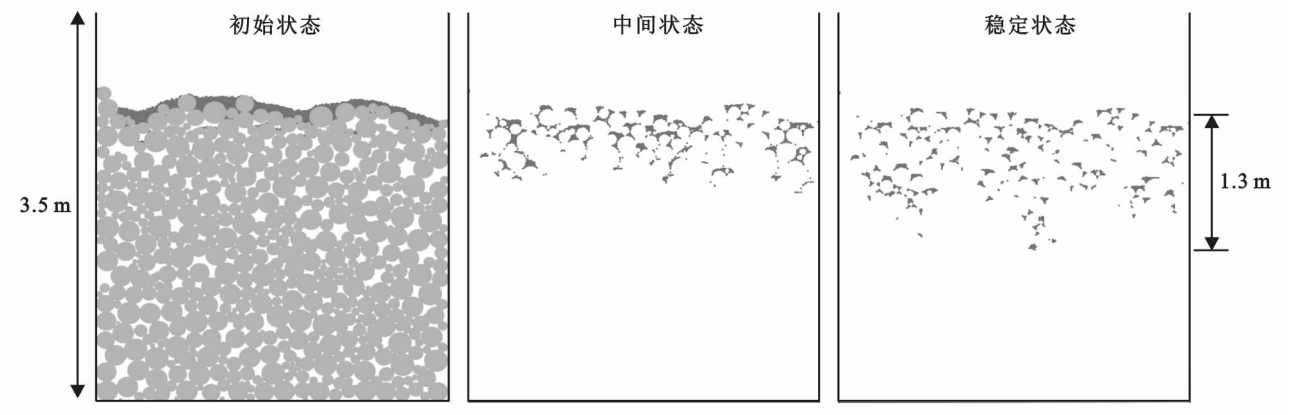


图 2 大孔隙黄土模型降雨入渗结果

一般认为大型黄土滑坡的发生是由于降雨通过优势渗流通道流入了深部土体中导致的。野外地质调查中发现，黄土滑坡的后缘拉张裂缝是十分常见的。建立含裂缝黄土模型，研究黄土中优势渗流通道的快速下渗机理。裂缝布设在模型中间，宽 0.5 m，深 1.0 m。提取初始状态、中间状态和稳定状态 3 个阶段进行研究。降雨初期，水颗粒在到达地表之后，一部分从地表向下迁移，同时另一部分水颗粒通过黄土中的裂缝直接到达土体内部，如图 3 所示。随着入渗的发展，地表中的水颗粒和裂缝中的水颗粒同时向下迁移，当到达稳定状态时，地表中的水颗粒下渗深度和之前保持一致，约为 1.3 m，而裂缝中的水颗粒下渗至 2.3 m，即降雨入渗的影响深度为 2.3 m。当黄土中存在裂缝时，降雨入渗的影响深度更大，对土体的影响范围变大。从数值计算结果可以看出，在无裂缝黄土中下渗深度为 1.3 m，布设一条深度为 1.0 m 的裂缝后，最大下渗深度为 1.3 m＋1.0 m＝2.3 m。

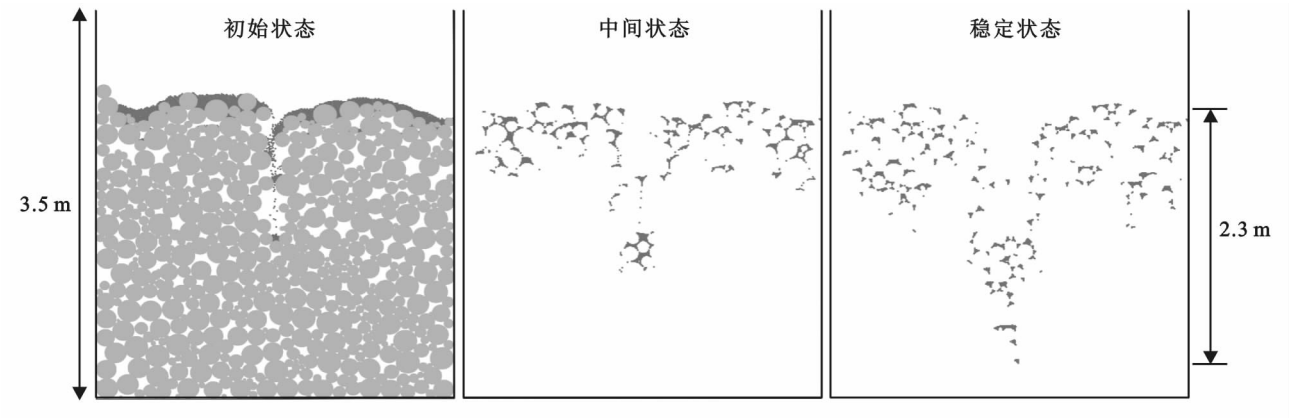


图 3　含裂缝黄土模型降雨入渗结果

图 4 是降雨入渗中裂缝的变化过程,将裂缝边缘的 5 个土颗粒选为标志点,颜色设为黑色以便观察。降雨伊始,裂缝无变化。随着降雨入渗的发展,可以看出裂缝的形态也在发生变化。当水颗粒从地表直接进入到裂缝中时,水颗粒在重力作用下向下移动,同时水颗粒和土颗粒之间发生摩擦,将裂缝边缘的土颗粒也携带向下运动,可以看出黑色的土颗粒已经发生了明显的位移,下部两个标志点在水颗粒的作用下已经和土体分离。当入渗达到稳定状态后,裂缝形态发生了很大变化,裂缝边缘的土颗粒向着裂缝中间移动,裂缝上部变宽,在下部形成了一个空洞,这一过程即是黄土中水的潜蚀作用。

在数值计算中没有考虑到水分的蒸发,且由于计算机运算能力的限制,模型颗粒较大。在实际情况中,裂缝边缘中的颗粒会随着水颗粒的迁移发生运动,若有临空面,如在陡坎边缘等附近,由于临空面的存在为水流提供了通道和为黄土物质提供了搬运空间,裂缝会发展为落水洞、暗穴[17],这就形成了更大的优势渗流通道,为黄土滑坡灾害的发生提供了潜在条件。



图 4　降雨入渗中裂缝的变化过程

数值计算表明,当无优势渗流通道时,降雨入渗的深度非常有限,这不足以诱发大规模黄土滑坡。当含有优势渗流通道:节理、陷坑、落水洞、裂缝等,降雨通道优势渗流通道可入渗至滑坡体深部,为大规模黄土滑坡的发生提供条件。随着降雨的发生,首先雨水通过黄土大孔隙和黄土垂直节理等入渗至浅表层,随着长时间的降雨,通过雨滴溅蚀等水力侵蚀作用,土体表面形成陷坑,在潜蚀作用下,继续发展为落水洞,最终连续多个落水洞贯通形成裂缝,同时随着滑坡的演化,在坡体后缘产生拉张裂缝,最终在共同作用下,沿着裂缝产生错台,最终诱发大规模的黄土滑坡灾害。

3　结 论

现场观测试验表明,黄土地区降雨入渗的深度不超过 1.5 m,不足以诱发大规模的滑坡灾害。

数值计算结果表明:由于理想致密模型中颗粒排列紧密,孔隙很小,所以降雨入渗深度仅为 0.3 m。大孔隙黄土模型降雨入渗深度为 1.3 m,当黄土中存在优势渗流通道时,雨水沿着优势渗流通道快速下渗至土体的更深处 2.3 m。

降雨入渗深度和裂缝的深度、宽度有关,裂缝越深、越宽,降雨入渗的深度越大,影响范围越广,且裂缝的几何形态随着降雨入渗过程的发展而发生变化。

黄土中节理发育，斜坡临空面产生卸荷裂缝，这都成为地表水的优势渗流通道，使得更多的水下渗至土体的深部，在水的软化和润滑作用下，土体抗剪强度降低，斜坡稳定性变小，从而诱发黄土滑坡灾害。

[参 考 文 献]

[1] 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)：530-541.

[2] Tu X B, Kwong A K L, Dai F C, 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 王德潜. 洛川黄土潜水补给特征[J]. 水文地质工程地质，1982(5)：1-8.

[6] 阎太白，王德潜. 洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J]. 地质论评，1983，29(5)：418-427.

[7] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报，1995，3(1)：56-64.

[8] 李同录，龙建辉，李新生. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J]. 工程地质学报，2007，15(4)：500-505.

[9] Gao G. Formation and development of the structure of collapsing loess in China[J]. Engineering Geology, 1988，25(2/3/4)：235-245.

[10] 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.

[11] 孙其诚，王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展，2008，38(1)：87-100.

[12] 王光谦，倪晋仁. 颗粒流研究评述[J]. 力学与实践，1992，14(1)：7-19.

[13] 周健，池永. 颗粒流方法及 PFC2D 程序[J]. 岩土力学，2000，21(3)：271-274.

[14] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安：陕西科学技术出版社，1997.

[15] 周剑，张路青，戴福初，等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2013，31(S1)：2650-2659.

[16] Gunn R, Kinzer G D. The terminal fall velocity for water dropletsin stagnant air[J]. Journal of the Atmospheric Sciences，1949，6(4)：243-248.

[17] 彭建兵，李庆春，陈志新，等. 黄土洞穴灾害[M]. 北京：科学出版社，2009.

(上接第 230 页)

[16] 蔡崇法，丁树文，史志华，等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报，2000，14(2)：19-24.

[17] 黄金良，洪华生，张珞平，等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报，2004，18(5)：75-79.

[18] 吴益平，张秋霞，唐辉明，等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. 地球科学：中国地质大学学报，2014，39(7)：889-895.

[19] 姬怡微. 降雨诱发地质灾害预警预报研究[D]. 西安：长安大学，2013.

[20] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007[S]. 北京：中国水力水电出版社，2008.