

不同含水率条件下非饱和边坡的稳定性

鲜丹¹, 杨仲康²

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710100; 2. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 试图改进现有初始条件考量方法, 重点分析不同初始含水率条件下降雨入渗对边坡稳定性的作用机制, 为滑坡预警提供参考。[方法] 以甘肃省天水市廖集村滑坡为例, 基于无前期降雨和有前期降雨作用下实测土层含水率结果, 将其分别定义为天然和湿润状态, 作为初始条件建立渗流与应力的流—固耦合物理力学模型。[结果] 天然状态下, 非饱和入渗迅速, 但入渗仅局限于浅表层 1—2 m, 稳定系数在入渗初期显著下降, 但随着下渗的停滞而缓慢变化, 往往形成浅表层滑坡; 湿润条件下, 土体持水缓慢, 但能下渗到 3—4 m 以下的较深部位, 随着入渗深度的增大, 土体软化作用加强, 形成深部滑坡。所以, 土体干燥状态时, 进行 7 d 的雨量预警是有效的防灾方法。对于连阴雨天气, 土层较湿润, 要注重对滑坡体 4 m 以下部位孔隙水压力和坡脚位移形变的监测。[结论] 土体初始条件对非饱和入渗和稳定性变化过程具有显著影响, 是降雨触发型滑坡稳定性分析中不可忽略的因素。

关键词: 降雨型滑坡; 初始含水率; 数值模型; 入渗作用机制; 天水市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0123-07

中图分类号: P642, TU43

文献参数: 鲜丹, 杨仲康. 不同含水率条件下非饱和边坡的稳定性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 123-129. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.020. Xian Dan, Yang Zhongkang. Stability of unsaturated slope under different initial water contents[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 123-129.

Stability of Unsaturated Slope Under Different Initial Water Contents

XIAN Dan¹, YANG Zhongkang²

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi

710127, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] To improve the existing evaluation methods on initial conditions and understand the mechanism of rainfall infiltration on slope stability, in order to provide effective suggestions for landslide early warning. [Methods] Taking Liaoji landslides in southern of Tianshui City, Gansu Province as a case study, soil was defined as a natural or wet state based on whether there was a antecedent rain. The Boltzman model was applied to turn pore water pressure into water content. And the fluid-solid coupling models were established to make a numerical analysis. [Results] In a natural state, soil absorbed the rain rapidly, and infiltration were confined in the superficial layer of 1—2 m. The stability coefficient decreased significantly in the early stage, but slowed down with the stagnation of infiltration, and formed shallow landslides ultimately, similar to plastic sliding. In wet condition, soil held water slowly, but the infiltration reached deeper position(3—4 m) and increased its pore water pressure. As the increase of infiltration depth, the process of soil softening became stronger and stronger and the sliding surface was often occurred in the deep position. When the soil was dry, the 7-day rainfall warning was an effective method for disaster warning. While in the rainy weather, soil kept in wet, and the pore water pressure blow 4 m and the slope displacement should be monitored. [Conclusion] The initial conditions of soil have significant impact on the process of unsaturated seepage and stability changes. Consequently, it is an integrant factor in stability analysis of rain-induced landslides.

Keywords: rain-induced landslide; initial moisture content; numerical model; infiltration mechanism; Tianshui City

收稿日期: 2017-11-21

修回日期: 2018-12-25

资助项目: 国家自然科学基金国际合作项目“基于干涉测量和物联网技术的甘肃省南部地质灾害监测预警”(2013DFE23030); 甘肃省民生科技计划项目(1503FCME006); 中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2017-208)

第一作者: 鲜丹(1992—), 女(汉族), 四川省南充市人, 硕士, 研究方向为城市文化。E-mail: xian dan_nwu@qq.com.

在黄土高原地区,降雨是滑坡灾害最为重要和常见的诱发因素之一^[1],降雨入渗导致边坡失稳主要表现在:一方面是雨水入渗产生渗流作用,土体容重增高,边坡下滑力增加;另外一方面是雨水入渗,软化土体,使岩土体抗剪强度降低。众多研究表明^[2],入渗致滑的因素是多方面的,Rahardjo 等^[3]认为在饱和—非饱和渗流稳定分析中,对初始条件的正确考量是解决问题的关键之一。

初始条件主要指初始地下水位及初始孔隙水压力或含水量的分布。饱和状态时孔隙水压力可以较方便准确的测定,而实际情况中获取更为普遍的非饱和状态负孔隙水压力则较为困难。为了正确考虑初始含水率条件,朱伟等^[4]提出了一种以平均渗透强度来确定初始含水率的计算方法,袁俊平等^[5]通过现场实测和数值模拟方法总结了初始孔隙水压力确定的一般方法并分析各自的适用范围。而在考虑初始条件进行非饱和渗流稳定分析的研究中,付建新等^[6]基于有限差分方法,直接设置不同含水率作为初始条件进行二维入渗分析,认为土体初始含水率条件对入渗和稳定性的影响是随降雨强度的增加而降低的。Rahimi 等^[7]则在降雨边界上施加一个长期的小强度降雨来确定初始条件,詹良通等^[8]在数值解析中取平均降雨量。此外,更为普遍的方法是通过考虑前期降雨实现对初始条件的考量,唐栋等^[9]通过设置初始最大孔隙水压力为 $-75, -50, -25$ kPa 作为初始条件考虑对稳定性影响,并认为当考虑前期降雨天数 30 d 以上时,初始条件对安全系数的影响十分微弱。罗红明^[10]通过考虑不同前期降雨过程作用下形成的含水量分布作为后期降雨的初始条件,将降雨过程分为前期降雨和主降雨,分析前期降雨持时、强度和与主降雨的时间间隔与稳定性关系。其中直接设置坡体含水率简单有效,但数值计算中设置土体含水率处处相等并设定入渗深度,忽略了入渗的物理过程,解析结果仍需进一步验证。而通过施加前期降雨获取稳态渗流结果作为初始条件,事实上,在不同地区,不同地层条件下前期降雨的影响十分复杂,Segoni 等^[11]研究也认为利用前期降雨指数来考虑初始水率条件,获取结果与实际观测值存在一定出入。

本文以甘肃省天水市南部廖集村滑坡为例,综合现有评价方法,基于现场实测土体含水率将其分为天然和湿润状态,通过建立渗流与应力的流—固耦合物理力学模型,力图改进现有初始条件对非饱和渗流与稳定性影响的评估方法,着重探讨不同初始含水率条件下降雨入渗对边坡稳定性的作用机制,并初步尝试提出滑坡预警的建议,进而应用于天水南部地区降雨诱发型滑坡的预警和防灾减灾工作。

1 研究区概况

2013 年 6 月 19 日至 7 月 25 日,甘肃省天水市出现多次罕见暴雨天气,由李子气象站记录共有 4 次强降雨天气,6.20,7.8,7.22,7.25 日降雨量分别为 198.2,128.6,22.7,29.8 mm,共降雨 379.3 mm,此次连续性暴雨天气共诱发滑坡 415 处,造成 24 人死亡,1 人失踪,简称“7.25 群发性滑坡灾害”^[12]。经初步勘察发现,前两次突发性暴雨天气诱发了大量浅表层土质滑坡。后两次降雨量虽然较小,但在前期丰富降雨作用下土体含水率大幅度提高,呈湿润状态,滑坡事件依然发生,这些滑坡往往为黄土滑坡,滑带埋藏较深,虽然数量小但滑坡规模大,潜在危害更大。

以此次灾害事件为研究背景,选取天水市南部齐寿乡某缓倾滑坡为研究案例。该滑坡为黄土均质土层,发育在黄土丘陵前缘,钻孔揭示为更新世黄土(Q₃^{col}),依据岩心样品特征分为 3 层,受雨水淋溶作用在表层形成有机质层和钙质结核层,随着地下水作用减弱在其下部形成棕红色黄土状土层。滑坡类型为黄土层内滑坡,滑坡相对高程为 35 m,长 90 m,滑坡最宽处为 65 m,滑动距离短,最大崩滑落差不到 1 m,滑坡地貌特征不显著,滑坡再次滑动可能性较大。

2 流—固耦合数值模型

2.1 计算原理

降雨入渗导致斜坡内渗流场的变化,土体容重增加,下滑力增大,抗剪强度降低,其中所涉及的物理力学机制利用数值模型模拟由降雨引发的孔隙水压力重分布和滑坡稳定性评估已被广泛应用^[13]。具体的数值分析过程为:基于饱和—非饱和渗流理论,获取入渗条件下斜坡土体的瞬态含水率分布,并根据非饱和和抗剪强度理论,利用技术比较成熟的极限平衡法进行边坡稳定性分析^[14]。

将达西定律和质量守恒定律相结合就可推导出二维情况下以水头 H 为因变量的非饱和渗流控制方程,即 Richards 方程,微分方程为:

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

式中: H ——全水头, $H = h + z$ (压力水头+位置水头); K_x, K_y ——土体沿 X, Y 方向的渗透系数; θ ——体积含水率(%); t ——时间(h)。

对控制方程采用 Galerkin 有限元格式,将孔隙水压力作为节点自由度进行空间离散,获取区域渗流分析结果。为了考虑负孔隙水压力对抗剪强度的影响,Fredlund & Rahardjo 引入材料变量 ϕ^b 来定量分

析非饱和土抗剪强度随基质吸力增加而增加的非线性关系,公式即为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: c' ——有效黏聚力(N); φ' ——有效内摩擦角($^\circ$); φ^b ——对应基质吸力的内摩擦角($^\circ$),反映抗剪强度增长率与基质吸力的关系; u_a, u_w ——孔隙气压力和水压力(kPa); σ ——条块地面法向正应力(N)。

2.2 建构模型

2.2.1 设置初始条件 非饱和土是由固体颗粒、水及空气构成的三相体,土体中水的流动是由土水势所决定的,基质势的空间分布显著影响土水势,基质势即为基质吸力(即非饱和土的负孔隙水压力),基质吸力与土体体积含水率密切相关,Ning Lu 等^[15]认为非饱和土中孔隙压力水头的大小很大程度上取决于土体饱和度(含水量)与土体类型等。故尝试引入表达体积含水率与孔隙水压力关系的 Boltzman 模型^[16],由此孔隙水压力的设置就有了含水率的意义。Boltzman 模型为:

$$\theta(u_w) = \theta_s e^{\alpha u_w} \quad (3)$$

式中: $\theta(u_w)$ ——对应孔隙水压力时的体积含水率(%); θ_s ——饱和体积含水率(%); α ——饱和系数,本文取值 0.01。

吴玮江等^[17]研究表明,天水地区考虑灾害发生前 7 d 的有效降雨量,对分析降雨触发滑坡过程最有意义。故在 7 d 内未降雨条件下测得土体平均含水率为 17.63%,在 7 d 内发生降雨且降雨总量达到 80 mm 测得土体平均含水率为 19.06%。依照土力学对饱和度和分类标准将其分别定义为天然和湿润状态,基于实测结果,对孔隙水压力分布进行概化处理,借鉴包承纲等^[18]在研究膨胀土边坡时的做法,假定地下水位以上孔隙水压力随深度呈线性分布,在岩土模拟 Geostudio 软件 SEEP/W 模块中设置不同含水率条件下孔隙水压力的分布,首先,模拟多日未降雨情形,设置干燥状态,表层孔隙水压力控制在 102 kPa 附近;然后,模拟存在前期降雨情形,设置为湿润状态,孔隙水压力设置在 -63 kPa 左右,具体如表 1 所示。

表 1 不同含水率下材料参数

初始条件	θ /%	饱和度	u_w /kPa	u_w (验证)/kPa	C/kPa	φ ($^\circ$)	φ^b
天然	17.63	0.33	102	97	6.1	16.69	11.1
湿润	29.06	0.61	51	42	6.7	15.74	10.5

此外,土体含水率不同,土体抗剪强度也会产生深刻影响,随着含水量的增高,抗剪强度会降低,尤其是在黄土地区^[19]。所以为了更加准确进行稳定性评估,采集野外滑带样品,室内利用 VJT 环剪仪,重塑环状土样测定各对应含水率下的剪切强度,因为廖集村滑坡已显著位移,现阶段属于峰值后的变形与破坏^[20],故取残余剪切强度作为材料初始强度参数(表 1),其中 φ^b 取值为 $2/3\varphi$ 。

2.2.2 模型参数和降雨工况 土—水特征曲线(SWCC)是用于描述土吸力与含水量之间本构关系的函数,是模型进行非饱和和渗流分析所需的重要参数。通过颗粒级配曲线和密度等参数对比,选取李萍等^[21]在类似黄土地区实测基质吸力和含水率数据(张力计法),并用 Fredlund & Xing 模型进行拟合,将 Boltzman 模型计算的孔压与其实测结果验证,具有较高吻合度。Fredlund & Xing 拟合模型公式为:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right) \right] \right\}^c} \quad (4)$$

式中: ψ ——基质吸力(N); a, b, c ——拟合曲线形状参数,拟合参数取值分别为 11.4, 2.0, 0.9。

非饱和和渗透系数函数用于描述渗透系数对土体系统内孔隙水含量的依赖程度,但其变化范围很大且

不易测量,通常做法从土水特征曲线获取。利用 SEEP/W 模块内置程序,采用 Fredlund & Xing 方法,基于实测土水特征曲线,进行估算。其中饱和和渗透系数 $1.97 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ^[22],饱和含水率 47.93%,残余饱和度为 10%。

研究区多年降雨总量在 600~800 mm,降雨主要集中在夏季 7—8 月,多以暴雨形式出现。故优先考虑暴雨工况,降雨总量取 50 年一遇为 480 mm,降雨强度为 10 mm/h,持时 48 h。此外,另设置连阴雨天气工况,着重考虑小强度降雨入渗,考察土体吸湿过程和降雨历时的影响,降雨强度为 3 mm/h,持时 160 h。

进行应力分析时,主要利用 Geostudio 软件 SIGMA 模块,通过应力重分布和应力—孔隙水压力耦合来计算,边界条件处理为两侧水平约束和底部完全固定边界^[23]。为提高模型计算精度,二维模型网格划分为四边形和三角形单元,为减少高度非线性系统中经常出现的数值震荡和发散问题,非饱和和区域单元进行细化处理,共 7 445 个节点 7 430 个单元。

3 结果分析与讨论

3.1 非饱和和渗流过程

只有计算过程收敛所得到的瞬态渗流分析结果

才能合理有效,差值迭代图是十分直观有效的收敛判别依据^[24]。如图 1 差值虽然震荡,但数值递减,最终计算收敛。

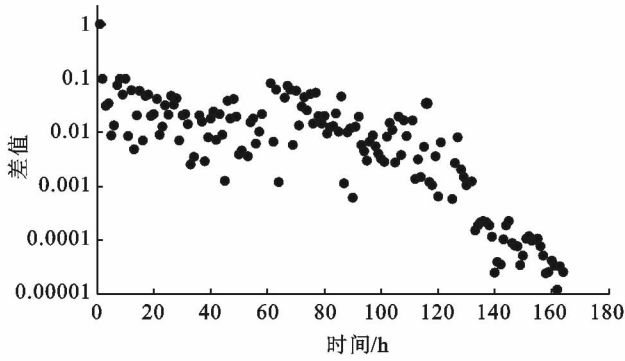


图 1 瞬态渗流过程差值迭代图

基于 SEEP/W 模块数值解析结果,得到瞬态孔隙水压力场。通过追踪孔隙水压力变化获取降雨入渗信息。首先,获取横向入渗信息(图 2),随着入渗的开始,孔隙水压力迅速升高,基质吸力锐减,直至稳定在较低值,反映了由浸润渗透转化为稳定渗透的非饱和一饱和的入渗过程。

其中,天然状态时,土体间含水率梯度值大,基质势能高,土体能更快速持水,在 12 h 内孔隙水压力就

由 -100 kPa 激增至 -6 kPa,基质吸力基本消失,达到稳定渗流。通过提取剖面 AB 处孔隙水压力随深度变化结果,获取垂向入渗信息(图 3—4),天然状态时,垂向渗透过程明显滞后于湿润状态。暴雨天气时,降雨 6 h,天然状态入渗深度不到 1 m,湿润状态已达到 2 m,降雨 24 h 后,天然状态下入渗深度基本停留在 3.2 m 左右,而湿润状态继续入渗,深度达到 4 m(图 3)。连阴雨天气时,由于降雨历时的延长,入渗深度差异更加显著,湿润状态时 -5 m 以下土体呈过饱和状态,下渗到了更深部位可能已经引起了下部浸润面的上升(图 4)。

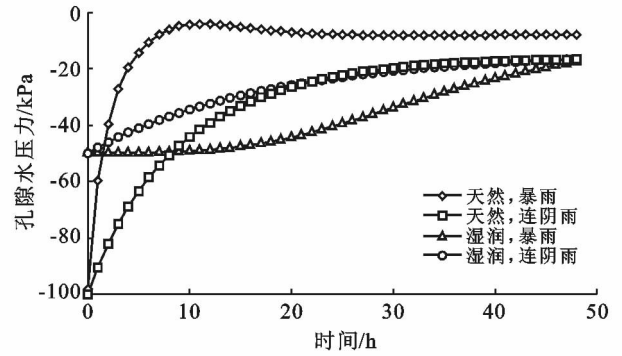


图 2 坡面上一点孔隙水压力与降雨持时的关系

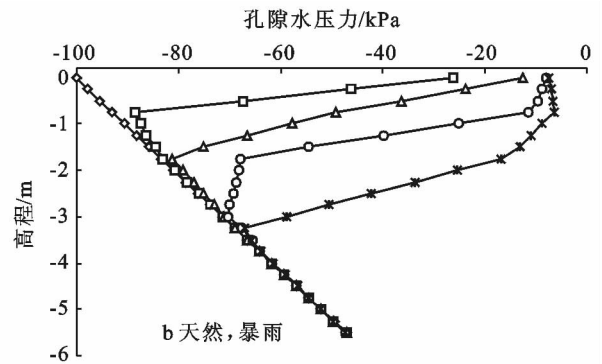
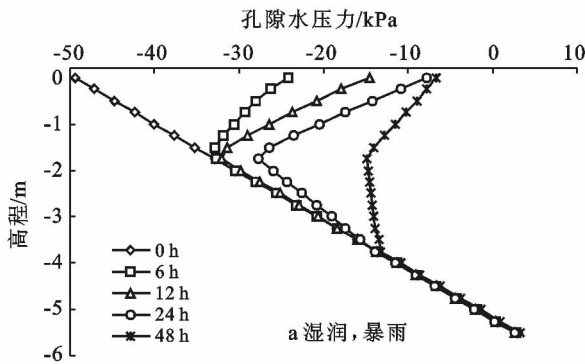


图 3 暴雨天气下剖面 AB 各深度孔隙水压力与降雨历时的关系

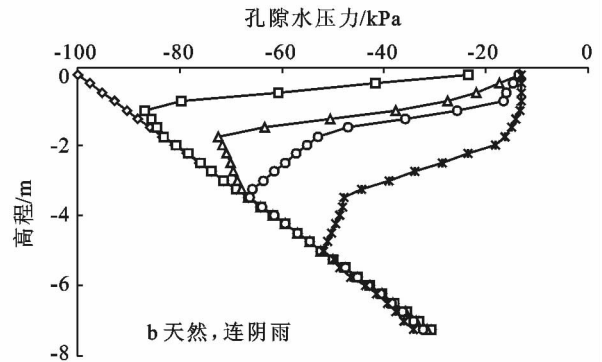
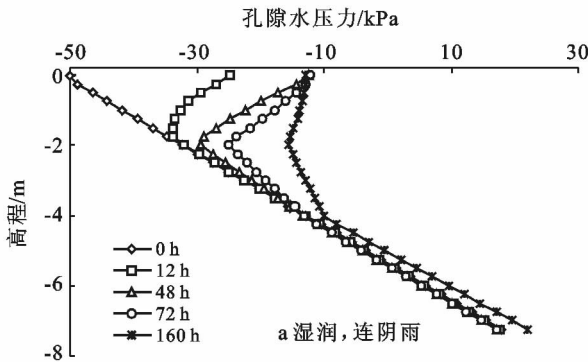


图 4 连阴雨天气剖面 AB 各深度孔隙水压力与降雨历时的关系

此外,在不同含水率条件下各深度孔隙水压力变化也呈现不同的特征,在天然状态下,边坡表层 1.5 m 深度内孔隙水压力被显著提升到 -6 kPa,接近正值,然而 1.5 m 深度以下孔隙水压力改变有限,土体仍能保持较强吸力。湿润状态时,相比较坡体表层,深度在 2 m 以下孔隙水压力被明显提升,曲线接近垂直,说明该部位渗流作用十分显著。

3.2 滑坡稳定性结果

SEEP/W 模块非饱和渗流模拟得到瞬态孔隙水压力场分布,将其导入到 SLOPE/W 模块进行耦合稳定性计算。结果如表 2 所示,首先,天然状态下初始稳定系数为 1.34,而湿润状态下仅为 1.16,初始稳定系数存在较大差异。说明考虑不同含水率条件下力学参数的变化而进行不同含水率状态下的剪切试验是十分有必要的。在不同含水率条件下对各雨型的响应是不同的,天然状态下对暴雨天气响应更加敏

感,最小安全系数下降幅度为 5.22%,湿润状态下对连阴雨天气响应更加积极,下降幅度高达 6.9%。细观安全系数随降雨历时演化曲线(图 5),发现不同初始含水率条件下,安全系数随降雨历时具有不同的阶段性变化特征。以暴雨天气为例,天然状态时在降雨前 12 h 内 F_s 迅速下降,12 h 以后 F_s 下降速率明显放缓,衰减特征为先快后慢,湿润状态时在降雨前 18 h 内 F_s 缓慢变化,然而在 18 h 以后开始迅速下降,并且呈现降雨之后继续下降的趋势。

表 2 稳定性计算结果

计算工况	初始安全系数	最小安全系数	下降比例/%
天然,暴雨	1.34	1.27	5.22
天然,连阴雨	1.34	1.31	2.24
湿润,暴雨	1.16	1.11	3.48
湿润,连阴雨	1.16	1.08	6.90

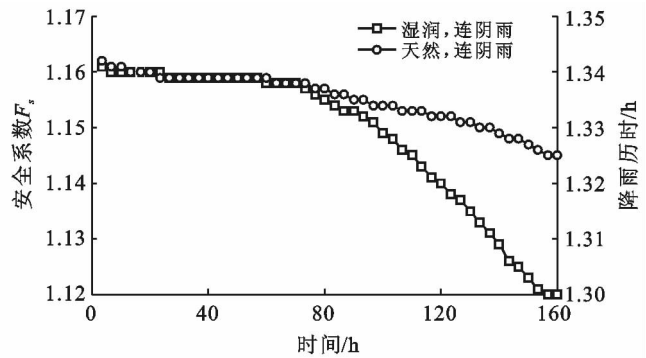
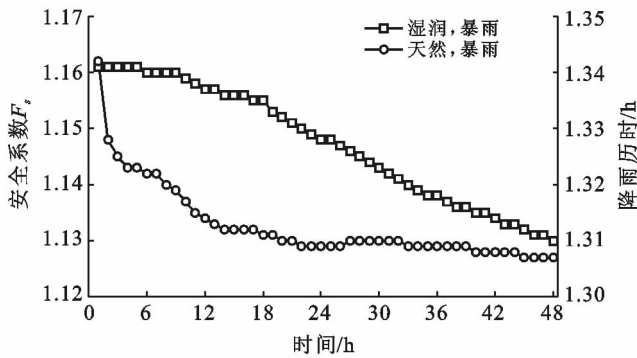


图 5 不同雨型条件下各含水率状态安全系数与降雨历时的关系

3.3 降雨入渗致滑作用机制分析

天然状态时,初始含水率仅为 17.63%,基质吸力强,持水迅速,仅降雨 12 h 土体孔隙水压力激增 95%,饱和度升高,基质吸力锐减,所以此过程中稳定系数迅速下降。经历短暂的浸润渗透进入到稳定渗透,此阶段之后表层 1—2 m 内土体孔隙水压力接近正值,不再变化,而下渗基本停滞,其余水分沿着坡表面排出,对深部土体孔隙水压力影响微弱,使其仍保持较强的吸力,所以稳定系数开始下降缓慢。从物理过程而言,干燥坡体遇突发性暴雨,迅速持水,在坡表形成暂态饱和区,入渗使下滑力增大,坡体受力而产生超静孔隙水压力^[25],由于持续入渗而超静孔隙水压力不能被快速消散,土体孔隙被水充填超过其临界孔隙率^[26],最终土体产生类似于“液化”的塑性滑动。在研究区普遍发育,为浅表层土质滑坡,规模小,发生时间短多在降雨中或降雨后迅速发生,滑坡过程多呈“溜滑”形式^[27]。

湿润状态时,初始含水率高,坡体内含水率梯度小,土体吸湿持水慢,所以在降雨前 12 h 内稳定系数变化缓慢,但随着降雨历时的延长,雨水能够持续向深部渗透并使其基质吸力锐减,此时稳定系数开始迅速下降。具体演化过程通过 SIGMA 模块对滑动面进行应力分析(图 6),在降雨 12 h 以前,入渗还停留在浅表层 1—2 m 处,滑动面附近孔隙水压力尚未受到影响,抗剪强度远大于剪应力,稳定系数变化不显著。降雨 12 h 以后,入渗深度达 3—4 m,接近滑动面附近,此时孔隙水压力被显著抬升,土体被软化,如图中 24 h 时曲线所示,抗剪强度下降,剪应力上升,此时稳定系数开始迅速下降,并且这种应力消涨变化在 0—40 m(坡脚)变化最为剧烈。

48 h 时,剪应力大范围超过抗剪强度,稳定系数持续下降濒临失稳。暴雨天气时,观测时间短且稳定性变化随降雨具有滞后性,湿润状态时稳定系数下降幅度比天然状态时小,当连阴雨天气时,降雨历时长,

降雨入渗对深部滑带软化作用则更加显著,稳定系数下降幅度为 6.9%, F_s 为 1.08,由此可判定此时已达到滑坡失稳临界值。这类滑坡往往为深层滑坡,滑带

深度在 6~12 m 左右,滑坡显著滞后于降雨,存在多级滑动,率先从坡脚开始,滑坡过程为“后退式渐进破坏”。

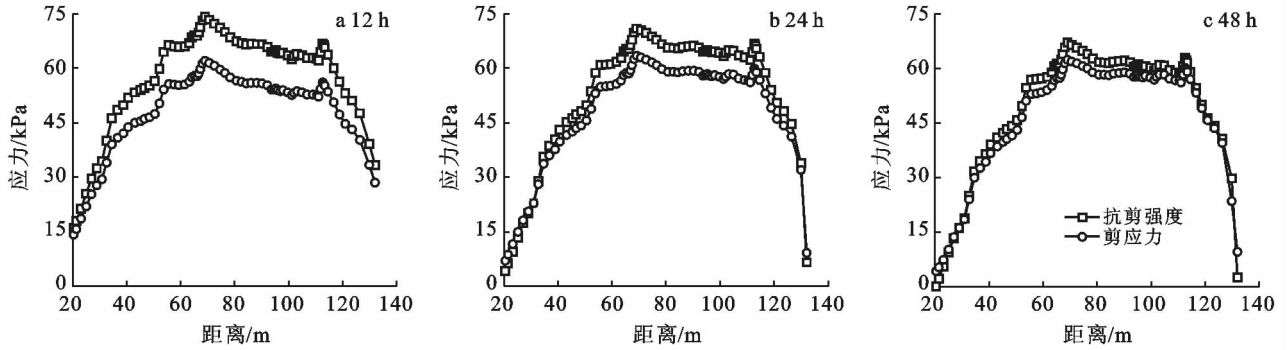


图 6 滑面上各节点应力状态与降雨历时的关系

4 结论

(1) 在非饱和渗流分析中,基质吸力起着关键作用,通过引入 Boltzman 模型使不同孔隙水压力的设置具有了含水率的意义,从而实现在土体天然和湿润 2 种初始条件下分析问题,计算结果也证明在对应含水率下进行剪切试验作为模型参数是很有必要的。

(2) 在天然状态下,土体初始含水率低,基质吸力强,持水快,但入渗仅局限于浅表层 1—2 m,所以入渗一旦开始,稳定系数迅速下降,随着入渗停止下移,稳定系数下降放缓。入渗造成边坡表层高饱和状态,使其滑坡特征为类似于液化的“溜滑”运动而形成浅表层滑坡。

(3) 在湿润条件下,含水率梯度小,入渗缓慢,但能入渗到边坡更深部位,并使其孔隙水压力发生显著变化。所以入渗之初,稳定系数无明显变化,只有入渗下移到 3~4 m 时,靠近滑带部位,稳定系数才开始迅速下降,往往滞后于降雨而形成深部滑坡。

天水市南部地区滑坡预警工作我们建议应该注意以下几点:在多日未降雨土体较干燥时,尤其注重对突发性暴雨天气的防范,这种条件下,滑坡发生迅速,滑动面浅,数量大,单体监测困难,雨量预警则是较高效的方法,可以借鉴彭建兵等^[26]在该地区提出的降雨阈值前 7 d 内降雨总量超过 239 mm,同时最大最强达到 20 mm/h 就可判断会有滑坡发生;当处于持续的连阴雨天气,土体呈湿润状态时,入渗能够到较深部位,此情形下应当防范滑坡的滞后效应,往往发生在降雨数十小时以后,重点监测厚层黄土分布区深度在 4 m 以下孔隙水压力的变化,同时关注斜坡前缘位移状态,共同作为预防此类深部滑坡发生的措施。

[参 考 文 献]

- [1] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡的运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报,2016,36(3):46-49.
- [2] Ali A, Huang J, Lyamin A V, et al. Boundary effects of rainfall-induced landslides[J]. Computers & Geotechnics, 2014,61(4):341-354.
- [3] Rahardjo H, Ong T H, Rezaur R B, et al. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2007,133(12):1532-1543.
- [4] 朱伟,程南军,陈学东,等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):235-240.
- [5] 袁俊平,褚飞飞,季李通. 饱和、非饱和和非稳定渗流数值分析中初始状态的研究[J]. 水利水电技术,2006,37(9):5-7.
- [6] 付建新,宋卫东,杜建华. 考虑二维降雨入渗的非饱和土边坡瞬态体积分含水率分析[J]. 工程科学学报,2015(4):407-413.
- [7] Rahimi M, Faza M. Characterization of shallow landslide through rainfall model [J]. Tissue Antigens, 2013,57(1):80-92.
- [8] 詹良通,贾官伟,陈云敏,等. 考虑土体非饱和特性的无限长斜坡降雨入渗解析解[J]. 岩土工程学报,2010,32(8):1214-1220.
- [9] 唐栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2013,34(11):3239-3248.
- [10] 罗红明. 降雨入渗条件下滑坡非饱和渗流特性与稳定性研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2008.
- [11] Segoni S, Leoni L, Benedetti A I, et al. Towards a definition of a real-time forecasting network for rainfall induced shallow landslides. [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2009,9(6):2119-2133.
- [12] 张成航,张茂省,于国强. 天水市群发地质灾害特征与

- 成灾机理[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 46-50.
- [13] Li Weichao, Lee M L, Cai Hong, et al. Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope[J]. *Engineering Geology*, 2013, 153(2): 105-113.
- [14] 高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. *人民长江*, 2001, 32(11): 25-27.
- [15] Lu Ning, William J L. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 35-37.
- [16] Mckee C, Bumb A. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site[C] // *Hazardous Wastes and Environmental Emergencies* (Hazardous Materials Control Research Institute National Conference). Houston, TX, 1984: 50-58.
- [17] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- [18] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 1-15.
- [19] 李爱国, 岳中琦, 谭国焯, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(3): 278-282.
- [20] 崔冠英, 朱济祥. 水利工程地质[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 35-36.
- [21] 李萍, 李同录, 王红, 等. 非饱和黄土土一水特征曲线与渗透系数 Childs&Collis-Geroge 模型预测[J]. *岩土力学*, 2013(S2): 184-189.
- [22] 杨仲康, 陈冠, 孟兴民, 等. 基于现场渗透试验的黄土滑坡体入渗特性[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(3): 285-291.
- [23] Peng Jianbin, Fan Zhongjie, Wu Di, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79-90.
- [24] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [25] Liu Chianan. Progressive failure mechanism in one-dimensional stability analysis of shallow slope failures [J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 129-137.
- [26] Francesca C, Victor S, Springmansarah M. Hydromechanical behaviour of a silty sand from a steep slope triggered. [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(1): 28-40.
- [27] 于国强, 张茂省, 胡炜. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. *西北地质*, 2014, 47(3): 185-191.
- [28] Peng Jianbin, Fan Zhongjie, Wu Di, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79-90.

(上接第 122 页)

- [4] 雷祥义. 黄土地质灾害的形成机理与防治对策[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [5] 李善梅, 刘之葵, 蒙剑坪. pH 值对桂林红黏土界限含水率的影响及其机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1814-1822.
- [6] 师林, 朱大勇, 陈龙飞. 酸碱度值对土体液、塑限的影响[J]. *工业建筑*, 2011, 41(7): 70-73.
- [7] 庄雅婷, 黄炎和, 林金石. 崩岗红土层土壤液塑限特性及影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 208-211, 216.
- [8] Stanchi S, Catoni M, D'Amico M E, et al. Liquid and plastic limits of clayey, organic C-rich mountain soils: Role of organic matter and mineralogy [J]. *Catena*, 2017, 151: 238-246.
- [9] Stanchi S, D'Amico M, Zanini E, et al. Liquid and plastic limits of mountain soils as a function of the soil and horizon type[J]. *Catena*, 2015, 135: 114-121.
- [10] Wei Yujie, Wu Xinliang, Cai Chongfa. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure[J]. *Catena*, 2015, 135: 254-262.
- [11] 郭玉文, 宋菲, 加藤诚. 黄土中碳酸钙分布的能谱分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(9): 1004-1007.
- [12] 郭玉文, 王淑红, 张玉龙. 黄土高原灌溉农田土壤团粒与碳酸钙关系研究[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2008, 25(3): 314-319.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利出版社, 1999.
- [14] 刘连文, 王洪涛, 陈晔, 等. 黄土醋酸淋溶实验及其碳酸盐组分的地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(1): 69-73.
- [15] Li Xi'an, Li Lincui. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: An experimental study[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 523. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6855-7>.
- [16] 郭泽泽, 李喜安, 陈阳, 等. 基于 SEM-EDS 的湿陷性黄土黏土矿物定量分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 899-906.