

# 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展

徐卫亚<sup>1,2</sup>, 周伟杰<sup>1,2</sup>, 闫龙<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 从非饱和降雨入渗特性、堆积体滑坡稳定性评价方法、降雨诱发堆积体滑坡失稳机理三方面, 综述了国内外降雨型堆积体滑坡渗流稳定性的研究进展。针对目前降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究中存在的不足, 指出今后应明确降雨型堆积体滑坡的地质结构特征, 深入研究渗流与径流的耦合机制及渗流-地质结构-力学参数的互馈耦合作用机制, 加强降雨型堆积体滑坡的动态灾变机制研究, 完善降雨型堆积体滑坡的安全性评价方法。

**关键词:** 堆积体滑坡; 降雨入渗; 渗流特性; 稳定性; 综述

**中图分类号:** TU44

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2020)04-0087-08

**Research progress on seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide**//XU Weiya<sup>1,2</sup>, ZHOU Weijie<sup>1,2</sup>, YAN Long<sup>1,2</sup> (1. *Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The research progress of seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide both at home and abroad is reviewed from the aspects of unsaturated rainfall infiltration characteristics, evaluation methods of stability for accumulation landslide and instability mechanism of rainfall-induced accumulation landslide. In view of the deficiency in the study of seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide, it is pointed out that the geological structure characteristics should be clarified. The coupling mechanism of seepage and runoff and the interaction mechanism of seepage-geological structure-mechanical parameters should be further investigated. The study of the dynamic disaster mechanism for rainfall-induced accumulation landslide should be strengthened and the safety evaluation method of rainfall-induced accumulation landslide should be improved in the future.

**Key words:** accumulation landslide; rainfall infiltration; seepage characteristics; stability; review

堆积体是指第四系堆积作用形成的地质体, 是基岩、古垮塌体、古崩滑体、现代崩滑体和第四系沉积体等的组合体。堆积体广泛分布于我国西南高山峻岭之中, 其结构松散, 透水性强, 在降雨影响下易发生地质灾害。典型的滑坡堆积体主要为土与石的混合物, 石块形状与尺寸各异, 使堆积体往往有着复杂的地质结构特征, 研究难度大。堆积体种类繁多, 按形成原因可分为滑坡堆积体、坡积堆积体、崩塌堆积体、泥石流堆积体、冲击堆积体、洪积堆积体、冰水堆积体、堰塞堆积体、混合堆积体等, 其中滑坡堆积体比较常见, 为前期滑坡堆积形成, 在所有堆积体中占有不小的比例。根据王自高<sup>[1]</sup>的统计, 近40年来我国西南地区发生的主要滑坡地质灾害大多是由降雨造成, 表明降雨是造成滑坡失稳的主要诱发因素。为了有效减少滑坡灾害的发生, 需要着重研究降雨

型堆积体滑坡的降雨入渗特性、稳定性评价方法及失稳机理。本文主要综述这三方面的研究进展, 并对需进一步深入研究的内容作了展望, 为揭示降雨型堆积体滑坡致灾机理及防治对策提供科学支撑。

## 1 非饱和降雨入渗特性

饱和-非饱和降雨入渗是指降雨由堆积体浅层非饱和区渗入深层饱和区的过程, 在降雨过程中, 堆积体的渗透能力随饱和度变化而不断变化, 因此对非饱和降雨入渗率的准确求解是得到非饱和降雨入渗特性的关键。目前的饱和-非饱和降雨入渗理论认为, 降雨入渗率受堆积体滑坡的入渗能力和降雨强度影响。当降雨强度小于入渗能力时, 入渗率为降雨强度; 当降雨强度大于入渗能力时, 将产生地表径流和地下渗流, 此时入渗率接近入渗能力。入渗能力

的确定与岩土体结构及水文地质结构有关。图1简要描述了地下水入渗率随时间变化的特征,图中实线表示岩土体在一定的水头作用下的入渗率的变化,虚线表示一定雨强施加过程中入渗率的变化情况,两种入渗曲线的入渗率最终均下降至一个稳定值。

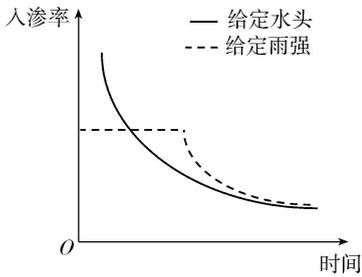


图1 入渗率随时间变化曲线

目前许多研究假定降雨强度恒小于入渗能力<sup>[2-3]</sup>,从而简化边界条件的处理。也有一部分学者在研究雨强较大的降雨时,考虑了雨强大于入渗能力的情况,这种情况可以分为两类,一类是超渗坡面流,即降雨强度超出了土壤能够入渗的最大限度,从而产生径流;另一类是蓄满坡面流,即土壤饱和后入渗能力降低而产生径流<sup>[4]</sup>。早期的研究主要通过非饱和降雨入渗模型来描述降雨入渗的过程,如Horton等<sup>[5-6]</sup>提出了经验性的降雨入渗模型,用于描述土体在降雨量不受限制时的入渗情况,但该模型不适用于常规的降雨条件。为了解决这个问题,Chu等<sup>[7-8]</sup>改进了降雨入渗模型,使之适用于降雨强度小于入渗率的情况。此外,Cho<sup>[9]</sup>在Green-Ampt模型的基础上考虑了浅层不透水边界,有效模拟了降雨在含有浅层不透水基岩的滑坡饱和区内的渗流。

研究非饱和降雨入渗特性常用的方法有人工降雨入渗试验、数值解析法等。人工降雨试验的优点是能够准确获得实际的入渗量与径流量,得到更合理的规律。目前的人工降雨试验可分为室外降雨试验和室内降雨试验。张燕青<sup>[10]</sup>根据室外降雨试验结果,拟合出相应数值模型的边界条件,利用该边界条件进行不同条件下土坡渗流场的计算;朱伟等<sup>[11]</sup>认为入渗率主要受初始含水率和降雨强度的影响,并进行了室内降雨入渗土柱试验,得到了不同降雨强度、初始含水率下土柱入渗率随时间变化规律以及不同初始含水率、恒定水头作用下的土柱入渗能力变化曲线,将入渗边界控制模式分为3个阶段:流量控制阶段、交替控制阶段以及水头控制阶段。

李宁等<sup>[4]</sup>在处理入渗问题时,假定坡面积水深度为0,即坡面的积水会很快沿着斜坡流走,但实际上当降雨持时较长时,如果不考虑积水深度的影响

就会造成较大的误差。因此许多学者研究了地表径流与地下渗流的耦合问题,采用一定的算法将坡面流方程与地下水流动方程通过入渗率耦合起来。Woolhiser等<sup>[12]</sup>给出了缓坡条件下的地表水流动模型,为使该模型适用于陡坡,Yen等<sup>[13]</sup>将水深 $h$ 在垂直方向的压力水头修正为 $h\cos\theta$ ,提出陡坡情况下的地表水流动模型,如图2所示,其控制方程可用式(1)(2)表示。

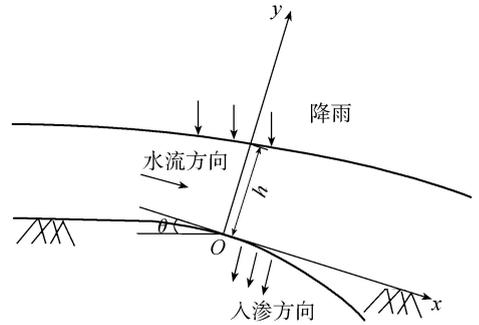


图2 陡坡地表水流动模型

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = r - f \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + gh\cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_0 - S_f) \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $h$ 为地表积水深度; $u$ 为断面平均流速; $\theta$ 为坡角; $S_0$ 为底坡降; $S_f$ 为摩擦坡降; $r$ 为降雨强度; $f$ 为入渗率; $g$ 为重力加速度。

饱和-非饱和和地下水流动方程可表述为

$$m_w \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: $H$ 为土水势; $m_w$ 为土-水特征曲线斜率; $\rho_w$ 为水的密度; $k_x, k_y$ 分别为 $x, y$ 方向的渗透系数。

径流与渗流耦合就是将坡面流方程与地下水流动方程迭代计算的方法。利用径流与渗流耦合方法,Kwok<sup>[14]</sup>进行了入渗量影响因素的敏感性分析,认为影响入渗量的最主要因素是饱和渗透系数;汤有光等<sup>[15]</sup>研究了地表径流与地下渗流耦合作用对入渗的影响,提出了一种径流-渗流耦合的迭代计算方法,通过耦合计算,发现当降雨强度越大时,地表径流与渗流耦合对渗流场的影响越小,因此,渗流-径流耦合适合在久雨条件下考虑;张培文等<sup>[16]</sup>使用迭代计算研究了坡面径流与入渗的耦合问题,相比于前人的研究,张培文等的算法假定了地表饱和判断的范围,增加了收敛速度;童富果等<sup>[17]</sup>改进了耦合计算方法,避免了繁琐的迭代计算,计算效率更高。

对堆积体滑坡这种高渗透性、结构松散的地质体,稳定性研究必须着重考虑其渗流特性。目前对非饱和降雨入渗的研究仍有两方面值得商榷,一方

面,将降雨大多简化为连续型降雨,未能考虑降雨在时间与空间的不连续性,这样简化是否符合实际需要进行进一步研究;另一方面,堆积体滑坡的入渗率计算采用土质边坡的计算模型是否合理也尚无定论,且计算入渗率时将流量边界转换为水头边界的临界点简单定为坡体饱和尚有缺陷,这导致计算结果往往与试验结果有一定的误差。

## 2 堆积体滑坡稳定性评价方法

堆积体滑坡不同于普通的斜坡,结构上通常存在古滑带,组成复杂,很难准确判别其稳定性。目前对堆积体滑坡稳定性的分析方法依旧采用常规边坡稳定性的分析方法,主要有极限平衡法、有限元法、离散元法、有限差分法等。极限平衡法原理简单,物理意义明确,通过安全系数评价滑坡稳定性,是比较常用的稳定性分析方法。有限元法在堆积体稳定性分析中运用广泛,通常是通过应力场、位移场、塑性区等特征来评价滑坡的稳定性。

Chen 等<sup>[18]</sup>使用经典极限平衡法与有限元数值方法对降雨诱发滑坡机理进行了研究,计算结果显示两种方法计算的危险滑面几乎一致;刘俊新等<sup>[19]</sup>运用有限元法,建立了非饱和水-气两相流固耦合方程,对比了考虑流固耦合与不考虑流固耦合对滑坡稳定性影响的差异;张绪涛<sup>[20]</sup>基于 Sarma 法基本原理,提出了考虑地表入渗的岩体边坡稳定性分析的方法——改进 Sarma 法,编制了相应的程序,该程序考虑了非饱和带基质吸力对岩体抗剪强度的贡献以及暂态附加水荷载对岩体边坡稳定性的不利影响。徐晗等<sup>[21]</sup>基于有限元法建立了考虑水力渗透系数特征曲线和土-水特征曲线的流固耦合计算模型,基于 ABAQUS 进行二次开发,引入修正的摩尔库伦破坏准则,进行了非饱和渗流场和应力场的耦合分析;蒋中明等<sup>[22]</sup>利用有限差分法,通过自编的 Fish 函数模拟了三维边坡降雨入渗过程,弥补了 FLAC 在求解非饱和问题时的不足。

尽管极限平衡法与有限元法得到了广泛应用,但两者都有一定的局限性:极限平衡法虽然可以获得滑坡的安全系数,但是无法研究滑坡的应力应变状态,只能得到滑坡的整体稳定性情况;而有限元法基于岩土体本构关系,能够反映滑坡的破坏机理,但无法直观地评价滑坡的稳定性。

为了弥补两者的局限性,极限平衡有限元法逐渐发展起来。近年来,国内外学者对极限平衡有限元法的研究日益完善。曾亚武等<sup>[23]</sup>将滑坡稳定性分析的有限元法和极限平衡法相结合,通过有限元法得到的应力场和位移场,利用应力张量变换求出

条分底部应力,并由极限平衡法得到滑坡的安全系数;徐卫亚等<sup>[24]</sup>基于 Dijkstra 算法建立了滑坡稳定性极限平衡有限元分析方法,该方法计算得到的安全系数介于极限平衡法和强度折减法之间,危险滑动面位置与这两种方法计算得到的危险滑动面位置基本一致。刘耀儒等<sup>[25]</sup>采用多重网格法,分别建立用于有限元计算的结构网格和用于计算滑面稳定安全系数的滑面网格,可以方便地获得任意滑面的稳定安全系数,从而将有限元与极限平衡法结合起来。Liu 等<sup>[26]</sup>提出了基于非线性有限元的极限平衡法,认为该方法不仅提高了有限元法精确模拟复杂地质构造的能力,而且提高了极限平衡法的适应性和全面性。

堆积体滑坡在渗流作用下会发生较大的变形,因此有必要研究渗流与堆积体的相互作用机制。目前对滑坡稳定性的流固耦合研究分为两种,一种是单向流固耦合,一种是双向流固耦合。

**a. 单向流固耦合。**在某些条件下,堆积体产生的变形是微小的,变形对渗透能力的影响可以忽略不计,这时可以只考虑渗流对变形的影响,而不考虑变形对渗流的影响,即所谓的单向流固耦合。GeoStudio 软件中的 Seep-Sigma-Slope 耦合计算是一种单向流固耦合计算方法,其首先计算出渗流场分布,再基于孔隙水压力进行应力应变计算。魏宝龙等<sup>[27]</sup>采用此方法研究了某库区堆积体滑坡在暴雨条件下的失稳机制,揭示了堆积体滑坡在降雨入渗作用下稳定性的变化过程。

**b. 双向流固耦合。**双向流固耦合同时考虑渗流对堆积体变形的影响以及堆积体变形对渗透特性的影响,在每一步迭代中,流体计算将孔隙水压力传递到固体计算中,同时,固体计算将节点位移传递到流体计算中,从而在每一次迭代计算后更新渗流场与位移场的数值。流固耦合计算通常需要以下条件:流体平衡方程、动量守恒、相容方程、达西定理、毛细定律、流体本构方程以及力学本构方程。

刘俊新等<sup>[19-21]</sup>的研究表明,流固耦合对滑坡稳定性计算结果影响明显;Casconi 等<sup>[28]</sup>对比了极限平衡法、单向流固耦合法以及双向流固耦合法对流动性滑坡稳定性的计算结果,认为双向流固耦合法能够研究滑坡在后继屈服阶段的特性。

有限元法与极限平衡法在堆积体滑坡稳定性的研究中运用较为广泛,而极限平衡有限元法由于有效地弥补了有限元法与刚体极限平衡法的不足,使计算能在不脱离本构的条件下准确客观地评价滑坡的安全程度,因而成为了滑坡稳定性研究方法中的一大热点。特别地,降雨型堆积体滑坡稳定性分析

中,水与堆积体的相互作用是不可忽视的,因此有学者将流固耦合运用到堆积体滑坡的稳定性分析中。但由于地质条件的复杂性、完全耦合计算收敛困难等因素,大多数研究还是简化了流固体的相互作用,因而在堆积体滑坡全耦合计算分析方面还需要进一步加强。

### 3 降雨诱发堆积体滑坡失稳机理

#### 3.1 降雨型堆积体滑坡失稳的直接诱因

对降雨入渗下堆积体渗流稳定性这一热点问题的研究,主要是从研究堆积体非饱和渗流开始的。在非饱和渗流影响下,堆积体滑坡的基质吸力降低、孔隙水压力增加以及滑坡体重力荷载增加是降雨型堆积体滑坡失稳的直接诱因。许多学者研究了堆积体内部的孔压、土压、基质吸力及含水率等的变化规律,揭示了降雨条件下滑坡稳定性的演化机制。Lv等<sup>[29]</sup>基于非饱和渗流理论,利用数值模拟方法研究了煤岩质边坡在渗流作用下的稳定性,发现高孔隙水应力会影响裂隙网络,使裂缝增多,入渗速率加快,有效应力降低,进一步导致煤岩边坡失稳;Oh等<sup>[30]</sup>认为非饱和渗流条件下的滑坡稳定性与土体的基质吸力、体积含水率密切相关;陈善雄等<sup>[31]</sup>认为饱和度影响基质吸力并进一步影响非饱和土土的抗剪强度;李兆平等<sup>[32]</sup>基于非饱和渗流理论,构建了一维瞬态含水率模型,并依据非饱和抗剪强度公式,推算出与基质吸力相关的安全系数公式,并将其应用于工程实例中。

#### 3.2 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性的影响因素

降雨入渗对滑坡渗流场以及稳定性的影响是受多方面因素控制的,前期降雨、土体渗透系数、坡角、降雨雨型、降雨持时等都是主要的影响因素。其中,前期降雨影响了土体的初始饱和度,进而影响了渗流场;土体渗透系数影响了降雨入渗的速率,进而影响渗流场;坡角影响了坡体的受力方向和入渗率,进而影响渗流场与应力场;降雨雨型、持时等均直接影响渗流场变化。根据影响因素的类别可将其分为内在因素和外在因素,内在因素即堆积体滑坡的类型、结构、形态与性质等,外在因素即降雨强度、降雨持时、前期降雨等外界触发因素。

##### 3.2.1 内在因素

降雨诱发堆积体滑坡渗流场与稳定性劣变的内在因素与滑坡的类型、结构、形态及渗透性能有关,且均能够进一步影响堆积体渗透特性或力学状态。其中,在坡体形态这一因素上,坡体厚度越大,降雨引起的位移越小<sup>[33]</sup>;坡角越大,降雨入渗越困难,径流量越大,越不容易形成贯通滑裂面,但坡角越大,

坡体越偏于凌空,这对稳定性是不利的<sup>[34]</sup>,因此,坡角对降雨作用下滑坡稳定性的影响不是单一的。对于双层土而言,其渗透特性与单层土不同:在降雨初始阶段,双层土的渗透率呈现与单层土类似的规律,而在入渗率稳定阶段,双层土的入渗率决定于下层土的渗透性能<sup>[35]</sup>。Damiano<sup>[36]</sup>认为,坡体中的粗土层可能会在降雨初期将渗流限制在上覆细土层中,延缓入渗。因此,多层土坡的入渗率与湿润锋所到达的土层的渗透系数有关(一般而言,深度越深,渗透系数越小),当湿润锋到达基岩表面时,湿润锋将很难下移,并形成平行于坡面的坡内流,此时,受动水压力影响,滑坡的安全系数将会明显降低。在滑坡结构这一因素上,王刚等<sup>[37]</sup>采用室内模型试验方法研究了垂直节理对滑坡稳定性的影响,认为滑坡结构对稳定性影响较大且大于降雨形式的影响。Liu等<sup>[38]</sup>的研究认为边坡内孔隙的变化对边坡变形与破坏有很大的影响。此外,不同类型的滑坡受到降雨影响的机制也不同,如承压水型滑坡容易在暴雨工况下发生失稳,而潜水型和层间水型滑坡更易在久雨工况下发生失稳<sup>[39]</sup>;渗透系数各向异性的土体相对于各向同性的土体受降雨的影响更大,随着水平渗透系数与垂直渗透系数比值的增大,坡体的稳定性随之降低<sup>[40]</sup>;压实度大的坡体(如高填方路堤边坡)由于渗透性能的降低而拥有更好的稳定性与强度<sup>[41]</sup>。

在影响堆积体渗透性能的众多因素中,裂隙是至关重要的。降雨造成滑坡失稳,实际上是内部裂隙不断扩展并形成贯通滑带的过程。邱路阳等<sup>[42]</sup>认为,降雨渗入坡内后,渗流主要集中在浅表面,并使得浅表面处部分土体产生局部膨胀,裂隙增加,孔压降低。当表层水渗入裂隙后,土体饱和度增加,孔压回升。周而复始便使得土体出现软化,裂隙进一步增长,滑面逐渐贯通。而另一方面,已有的裂缝对雨水的入渗速率有较大影响,研究表明,当降雨通过裂隙渠道入渗时会产生优势流。在滑坡中,多数降雨的入渗深度不会很深,而裂隙的存在相当于给降雨的入渗提供了优先通道。这种优先通道是许多降雨型滑坡发生的主要原因<sup>[43-44]</sup>。刘礼领等<sup>[45]</sup>认为滑坡体上存在大量裂隙,裂隙的考虑与否将带来完全不同的分析结果,考虑裂隙入渗时的计算结果与宏观观测结果更一致。考虑到裂隙这一因素对滑坡稳定性分析的重要性,王晓磊等<sup>[46]</sup>根据滑坡实际情况确定了裂隙布置方法,能够体现裂隙的产生及发展。阙云等<sup>[47]</sup>研究了不同深度、宽度、位置的裂隙对降雨入渗渗流场的影响,结果表明,裂缝越深,降雨造成的饱和区就越大,滑坡稳定性越低。刘华磊

等<sup>[48]</sup>研究了降雨条件下坡体裂缝的变化机理,发现降雨形成的表层横向径流,加之边坡临空条件影响,会导致微裂隙的形成,而微裂隙加剧了降雨入渗的速度,降雨入渗则又加剧了裂隙形成,最终在后缘处形成了贯通到软弱面的缝隙,使降雨更容易到达软弱面,导致滑坡的频繁发生。

### 3.2.2 触发因素

降雨雨型、降雨强度等外在因素对于滑坡稳定性的影响也是不可忽视的,尤其是复杂的雨型往往会带来复杂的滑坡渗流场变化,探索其影响机理也会有所困难。

降雨强度、降雨持时与滑坡发生的概率密切相关<sup>[49-50]</sup>。Chen等<sup>[51]</sup>分析了172次降雨引发山体滑坡的事件,发现大型滑坡通常是由于长时间中等强度的降雨造成的,而小型滑坡及浅层泥石流在不同的雨强-持时组合皆有可能发生,即降雨诱发滑坡存在暴雨诱发、久雨诱发等情况。谢守益等<sup>[52]</sup>分析了长江三峡地区两起滑坡复活事件,根据滑坡的物质条件、结构条件以及环境条件等,发现鸡扒子滑坡是典型的暴雨诱发滑坡,而新滩滑坡是典型的久雨诱发滑坡。林鸿州等<sup>[53]</sup>开展了土质边坡失稳模型试验,建议采用降雨强度和累计降雨量作为滑坡预警的参数,高强度降雨主要是产生坡面冲刷而影响稳定性,多造成表面流滑破坏;而累积降雨量较大的久雨型降雨则对滑坡深层的孔压造成影响,一旦造成滑坡,极有可能是毁灭性的大滑坡。谭新等<sup>[54]</sup>研究了前期降雨对滑坡渗流场的影响,发现前期降雨对渗流场有较大的影响,且降雨对渗流场的影响具有滞后性。汪益敏等<sup>[55]</sup>通过现场调查分析,认为金湖泵站左岸边坡稳定性的影响因素主要是岩性软弱、降水总量大、排水设施不足等。张玉成等<sup>[56]</sup>认为降雨诱发滑坡的因素中,前期降雨、降雨类型、临界降雨强度是主要的影响因素。林孝松等<sup>[57]</sup>从雨频、降雨周期、持时、雨量、雨型等多方面研究了滑坡与降雨的关系,认为对降雨与滑坡关系的研究需要各学科合作来完成,从而使滑坡灾害的研究更加系统化、综合化。

基于以上分析可以发现,影响降雨条件下滑坡稳定性的因素比较多,这些因素大多对滑坡的渗流特性和受力状态产生影响,进而劣化整体稳定性。而目前对于动态变化的复杂地形条件和水文条件作用下的稳定性研究还甚少,对堆积体滑坡的松散特性、结构的时空变化影响的考虑还不够。因此,堆积体滑坡在降雨条件下稳定性变化机制有待通过进一步研究来揭示。

## 4 研究展望

a. 明确降雨型堆积体滑坡的地质结构特征。确定堆积体滑坡的地质结构特征是开展渗流稳定性评价的基础。应加强野外现场工程地质特征的研究及原位动态监测,建立更为综合的降雨型堆积体滑坡分类体系,明确降雨型堆积体滑坡的工程地质结构及水文地质结构特征,形成堆积体滑坡的基本地质结构模型。针对不同的滑坡类属,根据滑坡的具体特征,建立具体全面的滑坡地质结构模型。

b. 深化渗流-地质结构-力学参数的互耦耦合作用机制研究。堆积体滑坡的降雨入渗是一个复杂的耦合过程,对渗流场、应力场的准确求解是十分困难的。现有研究大都基于一定假设,分析计算能力有限,模拟结果与现场原位监测和野外模型试验结果还存在一定的差距,对堆积体滑坡复杂结构的动态变化特征影响的考虑还不够。因此在明确地质结构的前提下,有必要开展大型室内外降雨入渗试验与数值试验,改进现有的计算方法,探求渗流与径流的耦合机制及渗流-地质结构-力学参数的互耦耦合作用机制。

c. 加强降雨型堆积体滑坡的动态灾变机制研究。将堆积体滑坡的失稳机制分析与堆积体的地质结构特别是水文地质结构联系起来,考虑降雨过程中堆积体结构与渗流、力学特性的动态劣化反应,引入更为符合实际的降雨模式,揭示久雨及暴雨诱发堆积体滑坡灾害的动态机制。

d. 完善降雨型堆积体滑坡的安全性评价方法。目前对降雨型堆积体滑坡的安全性评价方法的研究尚不成熟,应在充分收集整理实际堆积体滑坡基本地质特征、诱发触发因素、原位监测信息、数值物理模拟结果及灾变演化机制的基础上,充分利用学科交叉,以野外地质调查为基础,基于现场勘察、动态监测、理论分析、数值模拟、物理模型试验、风险评价等手段,综合运用人工智能、大数据分析等,突出互耦和耦合分析,对滑坡的安全性状况进行更为合理与全面的评估。

### 参考文献:

- [1] 王自高. 西南地区深切河谷大型堆积体工程地质研究[D]. 成都:成都理工大学,2015.
- [2] 崔亮,崔可锐. 基于ABAQUS对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(11):1560-1564. (CUI Liang, CUI Kerui. Stability studies of unsaturated soil slope under rainfall conditions based on ABAQUS[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2012,35

- (11);1560-1564. (in Chinese))
- [ 3 ] 杜敏. 基于 ABAQUS 土坡降雨入渗应力应变及稳定性研究[J]. 水资源开发与管理,2017(10):39-43. (DU Min. Study on stress strain and stability based on ABAQUS soil slope rainfall infiltration [ J ]. Water Resources Development and Management, 2017(10): 39-43. (in Chinese))
- [ 4 ] 李宁,许建聪. 基于 ABAQUS 的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 667-674. (LI Ning, XU Jiancong. Development and application of three-dimensional rainfall infiltration module based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(4):667-674. (in Chinese))
- [ 5 ] HORTON R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [ J ]. Soil Science Society of America Journal,1940,5(3):399-417.
- [ 6 ] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution[J]. Soil Science,1957,83(5): 345-358.
- [ 7 ] CHU S T. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resources Research,1978,14(3): 461-466.
- [ 8 ] MLS J. Effective rainfall estimation [ J ]. Journal of Hydrology,1980,45(3/4): 305-311.
- [ 9 ] CHO S E. Prediction of shallow landslide by surficial stability analysis considering rainfall infiltration [ J ]. Engineering Geology,2017,231: 126-138.
- [10] 张燕青. 基于数值分析的非饱和土坡面降雨非正交入渗的边界条件研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [11] 朱伟,陈学东,钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学,2006,27(11):1873-1879. (ZHU Wei, CHEN Xuedong, ZHONG Xiaochun. Observation and analysis of rainfall infiltration [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(11):1873-1879. (in Chinese))
- [12] WOOLHISER D A, LIGGETT J A. Unsteady, one dimension flow over a plane; the rising hydrograph [ J ]. Water Resources Research,1967,3(3): 753-771.
- [13] YEN B C, CHOW V T, AKAN A O. Stormwater runoff on urban areas of steep slope [ R ]. Washington D. C. : Environmental Protection Agency, 1977.
- [14] KWOK Y F. Stochastic analysis of coupled surface and subsurface flow model in steep slopes for slope stability analysis[D]. Hongkong: Hongkong University of Science and Technology,2003.
- [15] 汤有光,郭轶锋,吴宏伟,等. 考虑地表径流与地下渗流耦合的斜坡降雨入渗研究[J]. 岩土力学,2004, 25(9):1347-1352. (TANG Youguang, GUO Yifeng, WU Hongwei, et al. A preliminary study of rainfall infiltration on slope using a new coupled surface and subsurface flow model [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1347-1352. (in Chinese))
- [16] 张培文,刘德富,郑宏,等. 降雨条件下坡面径流和入渗耦合的数值模拟[J]. 岩土力学,2004,25(1):109-113. (ZHANG Peiwen, LIU Defu, ZHENG Hong, et al. Coupling numerical simulation of slope runoff and infiltration under rainfall conditions [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(1): 109-113. (in Chinese))
- [17] 童富果,田斌,刘德富. 改进的斜坡降雨入渗与坡面径流耦合算法研究[J]. 岩土力学,2008,29(4): 1035-1040. (TONG Fuguo, TIAN Bin, LIU Defu. A coupling analysis of slope runoff and infiltration under rainfall [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(4): 1035-1040. (in Chinese))
- [18] 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.
- [19] 刘俊新,刘育田,胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):903-910. (LIU Junxin, LIU Yutian, HU Qijun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 903-910. (in Chinese))
- [20] 张绪涛. 地表入渗影响下的边坡稳定性评价分析方法及其应用[D]. 济南:山东大学,2006.
- [21] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学,2005,26(12): 1957-1962. (XU Han, ZHU Yiwen, CAI Yuanqi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(12): 1957-1962. (in Chinese))
- [22] 蒋中明,熊小虎,曾铃. 基于 FLAC3D 平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J]. 岩土力学,2014, 35(3): 855-861. (JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC3D [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2014, 35(3): 855-861. (in Chinese))
- [23] 曾亚武,田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(增刊2): 5355-5359. (ZENG Yawu, TIAN Weiming. Slope stability analysis by combining FEM with limit equilibrium method [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (Sup2): 5355-5359. (in Chinese))
- [24] 徐卫亚,周家文,邓俊晔,等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报,2007, 29(8): 1159-1172. (XU Weiya, ZHOU Jiawen, DENG Junye, et al. Slope stability analysis of limit equilibrium finite element method based on the Dijkstra algorithm [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1159-1172. (in Chinese))
- [25] 刘耀儒,杨强,薛利军,等. 基于三维非线性有限元的边坡稳定分析方法[J]. 岩土力学,2007,28(9): 1894-1898. (LIU Yaoru, YANG Qiang, XUE Lijun, et al. Slope stability analysis based on 3-D nonlinear finite element method [ J ]. Rock and Soil Mechanics,2007,28

- (9): 1894-1898. (in Chinese))
- [26] LIU Yaoru, HE Zhu, LENG Kuangdai, et al. Dynamic limit equilibrium analysis of sliding block for rock slope based on nonlinear FEM [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(8): 2263-2274.
- [27] 魏宝龙, 徐卫亚, 王如宾. 降雨条件下某滑坡堆积体稳定性研究 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(2): 20-25. (WEI Baolong, XU Weiya, WANG Rubin. Research on stability of a slope deposit body under rainfall condition [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2015, 37(2): 20-25. (in Chinese))
- [28] CASCINI L, CUOMO S, PASTOR M, et al. Modeling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 136(1): 85-98.
- [29] LV Xiangfeng, WANG Zhenwei, WANG Jianguo. Seepage-damage coupling study of the stability of water-filled dump slope [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2014, 42(2): 77-83.
- [30] OH S, LU N. Slope stability analysis under unsaturated conditions: case studies of rainfall-induced failure of cut slopes [J]. *Engineering Geology*, 2014, 184: 96-103.
- [31] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法 [J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 447-450. (CHEN Shanxiong, CHEN Shouyi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rain water [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 447-450. (in Chinese))
- [32] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究 [J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 57-61. (LI Zhaoping, ZHANG Mi. Research on transient safety factor of unsaturated soil slope considering rainfall infiltration [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5): 57-61. (in Chinese))
- [33] 吴辉, 马双科, 郑娅娜. 暴雨及久雨条件对某滑坡变形破坏机制的影响研究 [J]. *中外公路*, 2012, 32(2): 30-36. (WU Hui, MA Shuangke, ZHENG Yana. Study on the influence of heavy rain and long rain on the deformation and failure mechanism of a landslide [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2012, 32(2): 30-36. (in Chinese))
- [34] 陈玺文. 堆积碎石土滑坡降雨致滑模型试验研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [35] 韩同春, 黄福明. 双层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(1): 39-45. (HAN Tongchun, HUANG Fuming. Rainfall infiltration process and stability analysis of two-layered slope [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(1): 39-45. (in Chinese))
- [36] DAMIANO E. Effects of layering on triggering mechanisms of rainfall-induced landslides in unsaturated pyroclastic granular soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(9): 1278-1290.
- [37] 王刚, 孙萍, 吴礼舟, 等. 降雨诱发浅表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))
- [38] LIU Junzhe, ZUO Changqun, SONG Yinjie, et al. Study on the attenuation mechanism of unsaturated residual soil under rainfall condition: a case study of the tiller and sediment soil in Qishan landslide, China [J]. *American Journal of Civil Engineering*, 2017, 5(4): 242-253.
- [39] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 1999(1): 21-23. (XIE Shouyi, XU Weiya. Mechanism of landslides induced by precipitation [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1999(1): 21-23. (in Chinese))
- [40] 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, 20(1): 1-14. (WU Hongwei, CHEN Shouyi, PANG Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 1-14. (in Chinese))
- [41] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(8): 1705-1709. (LIU Xinxi, XIA Yuanyou, CAI Junjie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(8): 1705-1709. (in Chinese))
- [42] 邱路阳, 刘毓炘, 李大勇. 高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(10): 2161-2166. (QIU Luyang, LIU Yuchuan, LI Dayong. A case study of failure mechanism of residual of soil filled embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2161-2166. (in Chinese))
- [43] ZHANG Ming, YANG Long, REN Xingwei, et al. Field model experiments to determine mechanisms of rainstorm-induced shallow landslides in the Feiyunjiang River basin, China [J]. *Engineering Geology*, 2019, 262: 1-9.
- [44] YANG Zongji, QIAO Jianping, UCHIMURA T, et al. Unsaturated hydro-mechanical behaviour of rainfall-induced mass remobilization in post-earthquake landslides [J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 102-110.
- [45] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(4): 1061-1066. (LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1061-1066. (in Chinese))
- [46] 王晓磊, 王旭春, 管晓明, 等. 暴雨情形下含裂隙土质边坡的瞬态稳定性 [J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 22-26. (WANG Xiaolei, WANG Xuchun, GUAN Xiaoming. Transient stability of soil slopes with fissures

under rainstorm condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(6): 22-26. (in Chinese))

[47] 阙云, 胡昌斌, 姚晓琴. 降雨入渗对裂隙性粘土边坡稳定性作用机理的分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 423-429. (QUE Yun, HU Changbin, YAO Xiaoqin. Mechanism analysis of the influence of the rainfall infiltration on the stability of fissured clay slope [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(3): 423-429. (in Chinese))

[48] 刘华磊, 徐则民, 张勇, 等. 降雨条件下边坡裂缝的演化机制及对边坡稳定性影响: 以云南省双柏县丁家坟滑坡为例 [J]. 灾害学, 2011, 26(1): 26-29. (LIU Hualei, XU Zemin, ZHANG Yong, et al. Evolutionary mechanism of slope fissures during rainfall and their effect on slope stability: a case study of Dingjafen landslide in Shuangbo Country, Yunnan [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 26-29. (in Chinese))

[49] YANG Zongji, CAI Huan, SHAO Wei, et al. Clarifying the hydrological mechanisms and thresholds for rainfall-induced landslide: in situ monitoring of big data to unsaturated slope stability analysis [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(4): 2139-2150.

[50] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update [J]. Landslides, 2008, 5(1): 3-17.

[51] CHEN C W, OGUCHI T, HAYAKAWA Y S, et al. Relationship between landslide size and rainfall conditions in Taiwan [J]. Landslides, 2017, 14(3): 1235-1240.

[52] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21-23. (XIE Shouyi, XU Weiya. Mechanism of landslides induced by precipitation [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1999, 32(1): 21-23. (in Chinese))

[53] 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 Hongzhou, 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))

[54] 谭新, 陈善雄, 杨明. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流分析 [J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 381-384. (TAN Xin, CHEN Shanxiong, YANG Ming. Saturated-unsaturated seepage analysis of slope under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 381-384. (in Chinese))

[55] 汪益敏, 陈页开, 韩大建, 等. 降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 39-43. (WANG Yimin, CHEN Yekai, HAN Dajian, et al. Case study on influence of rainfall permeation on slope stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 39-43. (in Chinese))

[56] 张玉成, 杨光华, 张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究 [J]. 灾害学, 2007, 22(1): 82-85. (ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Yuxing. Research on the relationship between landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 82-85. (in Chinese))

[57] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究 [J]. 灾害学, 2001, 16(2): 87-92. (LIN Xiaosong, GUO Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2): 87-92. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-11-19 编辑: 雷燕)

+++++

(上接第 86 页)

[71] 敬正书. 坚持科学发展观, 实现人水和谐 [J]. 水利发展研究, 2004(4): 5-7. (JING Zhengshu. Adhere to the scientific concept of development, to achieve harmony between human and water [J]. Water Resources Development Research, 2004(4): 5-7. (in Chinese))

[72] 魏智敏, 梅梅. 用科学发展观治水管水 [J]. 水科学与工程技术, 2005(2): 7-9. (WEI Zhimin, MEI Mei. Use scientific development view to control water [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2005(2): 7-9. (in Chinese))

[73] 邹美玲. 人水和谐与黄河生态保护 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36(6): 114-116. (ZOU Meiling. Human-water harmony and Yellow River ecological protection [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(6): 114-116. (in Chinese))

[74] 中华人民共和国水利部网站. “坚持节水优先, 强化水资源管理”有关情况发布会 [EB/OL]. (2019-03-22). <http://www.mwr.gov.cn/hd/zxft/zxzb/ft20190322/>. (收稿日期: 2019-09-14 编辑: 郑孝宇)

