

降雨对边坡稳定影响研究进展

王树照¹, 崔亚军¹, 魏敏², 张林宏², 冉德钦^{2*}

¹山东路桥集团有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2023年10月20日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月29日

摘要

降雨入渗过程是十分复杂的, 降雨入渗过程包括雨水沿坡顶面的渗入、沿坡面的渗入、沿坡体裂隙的渗入等多种形式。降雨导致边坡失稳的原因很多, 可归纳为降雨入渗在边坡体内形成地下水渗流、岩土体软化、基质吸力下降, 针对降雨作用下边坡失稳灾害影响, 国内外研究者对降雨作用下边坡稳定性做出大量研究。本文从降雨对边坡稳定性的影响、降雨渗流边界条件和边坡降雨入渗基本理论三个方面进行了综述, 以期对边坡失稳防治提出提供理论依据。

关键词

边坡, 稳定, 降雨, 渗流力学

Research Progress on the Impact of Rainfall on Slope Stability

Shuzhao Wang¹, Yajun Cui¹, Min Wei², Linhong Zhang², Deqin Ran^{2*}

¹Shandong Luqiao Group Co., Ltd, Jinan Shandong

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Received: Oct. 20th, 2023; accepted: Nov. 20th, 2023; published: Nov. 29th, 2023

Abstract

The process of rainfall infiltration is very complex, which includes various forms such as rainwater infiltration along the top surface of the slope, infiltration along the slope surface, and infiltration along the cracks of the slope. There are many reasons for slope instability caused by rainfall,

*通讯作者。

文章引用: 王树照, 崔亚军, 魏敏, 张林宏, 冉德钦. 降雨对边坡稳定影响研究进展[J]. 渗流力学进展, 2022, 12(3): 21-31. DOI: 10.12677/apf.2023.123003

which can be summarized as groundwater seepage, softening of rock and soil, and decrease in matrix suction caused by rainfall infiltration in the slope body. In response to the impact of slope instability disasters under rainfall, domestic and foreign researchers have conducted extensive research on slope stability under rainfall. This article reviews the impact of rainfall on slope stability, the boundary conditions of rainfall seepage, and the basic theory of slope rainfall infiltration, in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of slope instability.

Keywords

Slope, Stable, Rainfall, Seepage Mechanics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Neuman 等通过考虑坡体内饱和区和非饱和区, 建立相应饱和 - 非饱和渗流方程, 为计算岩土体饱和 - 非饱和状态提供依据[1]。Lam 和 Fredlund 以饱和土体水分运动理论和非饱和土的固结理论为基础, 求解出饱和 - 非饱和渗流控制方程, 以此为基础模拟边坡暂态渗流[2]。Charles W. W. NG 等以香港地区的实际情况为依据, 通过运用数值模拟的方法, 综合分析了各种影响边坡在降雨入渗下的因素, 得出了降雨的持续时间、强度和土体初始状态等和边坡是否稳定有着密切的关系[3]。Aurelian 等通过室内试验和数值模拟相结合的方法, 研究了降雨下边坡基质吸力变化情况, 并提出可预测一定降雨量下边坡雨水入渗深度的双曲线公式[4]。

Rong 等利用 ABAQUS 有限元程序, 模拟降雨入渗引起的瞬态渗流场问题, 并分析孔隙压力分布、位移场和等效塑性应变随时间的变化规律[5]。Feng 等以石济高速公路李家寨高边坡为工程原型, 通过大型模型试验模拟了高边坡在中、大、暴雨作用下的变形破坏特征, 为边坡监测和预警提供指导[6]。Seboong 等采用传统的极限平衡法和有限元方法, 对工程边坡降雨诱发破坏的案例进行研究, 分析了降雨条件下研究场地边坡破坏的原因[7]。Lul 等设计降雨诱发边坡破坏的模型试验, 观察了边坡变形和破坏, 并解释了可能的机理, 总结了边坡坡度、降雨强度对边坡变形和破坏过程的影响, 为类似条件下的应用提供参考[8]。Jian 用数值方法研究了降雨停止后对斜坡稳定性影响, 建立了两个有代表性的降雨后滑坡数值模型来说明边坡稳定性延迟现象的机理, 提出了降雨对边坡稳定性延迟现象的模型和影响因素[9]。蒋中明等在 FLAC3D 平台中基于 FISH 语言开发了边坡降雨入渗修正程序, 实现降雨边坡饱和 - 非饱和渗流数值模拟。对某边坡进行了 FLAC3D 数值分析, 并与已有结果进行了比较, 验证了其自编程序正确性。

吴国雄以滇西红层软岩工程特性为基础, 运用 FLAC3D 研究了不同降雨强度和降雨持时对红软岩特高路堤稳定性和形变规律的影响[10]。结果表明, 特高路堤安全系数随持续降雨而降低, 降雨强度越大, 特高路堤稳定安全系数越小。谢瑾荣等根据软岩抗剪强度遇水软化特性研究, 将软化后抗剪强度赋予降雨浅层饱和区, 在此基础上, 研究了降雨渗流条件下边坡的稳定性, 分析了边坡降雨灾害机理[11]。杨旭等人为解决华南巨厚层软岩边坡在强降雨条件下极易发生灾害问题, 根据相似的理论, 制作了表征软岩遇水软化特相似材料制备, 使用相似材料构建了软岩边坡相似模型, 研究了小雨、大雨和暴雨作用下软岩边坡的灾害过程和规律。付宏渊、魏佳潇、杨晴霞、史绪鑫对降雨入渗条件下软岩边坡稳定性进行了

研究。上述研究表明降雨型边坡稳定性,可使用室内模型试验和数值模拟方法进行研究[12]。

在边坡稳定性初期国内技术不是很成熟,主要是通过极限平衡法等定性的分析方法,对边坡稳定性进行初步研究和定制防护办法。然后技术成熟一点,主要是利用数值分析法,用于解决非均质、非线性的复杂边界稳定性问题,得出岩体中的应力应变关系,可以分析工程分步开挖、加固措施和其他因素对边坡稳定的影响。随着科学研究的进步,各学者开始使用弹塑性力学极限平衡法来研究边坡安全性,开始重视对边坡变形机理进行研究,并且取得一些重要的成果,潘家铮在研究过程中提出极大值理论和极小值理论,并且研究了水荷载对边坡土体产生的应力和边坡位移变形机理。

在实验室建立大型实验模型,对试验模型进行干湿循环实验,记录土体在水分入渗和蒸发干燥时发生的一系列动态变化,使用灌蜡法对土体缝隙进行定量分析,求出缝隙面积和体积参数,从而研究降雨和蒸发给边坡带来的影响[13]。研究不同前期降雨下边坡稳定性的影响,控制土体渗透系数不变,对土水特征曲线其他参数进行调整,最后得出进气值对边坡稳定性影响最大[14]。采用大型地质力学试验方法,对边坡在不同降雨条件下边坡稳定性影响,得出短时暴雨降雨条件主要影响边坡表层位移和孔隙水压力,长时小雨降雨对边坡深处位移和孔隙水压力影响比较大,并且研究了边坡在有支护和无支护条件下边坡稳定性的差异[15]。建立数值模型,对边坡渗流场和应力场进行耦合,得出边坡孔隙水压力与边坡变形和降雨量成正相关关系,以及边坡在不同降雨条件下稳定性的变化[16]。通过二维渗流模型和极限平衡法相结合,对边坡在降雨和蒸发条件下边坡稳定性的变化,得出降雨条件下边坡坡脚位置最先达到饱和状态,所以坡脚位置最容易发生滑坡[17]。

降雨条件下边坡滑坡是因为土体孔隙水压力升高造成边坡抗剪强度下降引起的。用有限元法模拟稳态和瞬态渗流场,提出了考虑基质吸力的普遍极限平衡法[18]。通过对多处滑坡的分析,认为前期降雨对边坡稳定性有一定的影响,并且研究前期降雨对边坡稳定性影响的机理。在研究中考虑可大量的因素,证明了降雨和土体自身参数对边坡稳定性影响很大[19]。对土水特征曲线参数进行细致的研究,分析土水特征曲线参数变化对具有不同排水效果边坡稳定性的影响,这些研究则相对比较详细,综合考虑了影响土体非饱和特性的多方面因素[20]。本文从降雨对边坡稳定性的影响、降雨渗流边界条件和边坡降雨入渗基本理论三个方面将进行了综述,以期对边坡失稳防治提出提供理论依据。

2. 降雨对边坡稳定性的影响

2.1. 有限元渗流理论

渗流有限元方法除了得到模型的应力—应变关系之外,还可得到模型的渗流要素。渗流有限元计算方法在岩土工程的渗流计算中应用十分广泛,主要基于非饱和土理论、渗流理论、本构关系等条件来进行渗流的相关分析,当岩土体饱和时,采用的渗流矩阵为:

$$[K]\{H\}=[Q]$$

当岩土体非饱和时,边坡采用的稳定渗流矩阵为:

$$[H]\{H\}+[M]\left\{\frac{\partial H}{\partial t}\right\}=[Q] \quad (1)$$

[K]——渗透系数矩阵;

{H}——总水头矩阵;

[M]——单位储水量矩阵;

[Q]——流量矩阵;

t——时间。

2.2. 降雨诱发边坡失稳的机理

自然界中有很多边坡在自然状态下均比较稳定，但是部分边坡在降雨条件下会由于坡体内部渗流作用的存在导致边坡的失稳破坏。目前人们已经对降雨与滑坡之间的关系进行了较为深入的研究，降雨诱发边坡失稳的机理概括如下：

1) 渗流作用

降雨入渗会减少作用在岩土体上的有效应力，使边坡岩土体的抗剪强度降低，即：

$$\tau = (\sigma - u) \tan \phi_m + C_m \quad (2)$$

τ —— 岩土体的抗剪强度；

σ —— 法向应力；

u —— 孔隙水压力；

ϕ_m —— 内摩擦角；

C_m —— 黏聚力。

由上式可知，随着孔隙水压力 u 的增大，岩土体的抗剪强度不断降低，当 u 增大到与法向应力相同时，即 $(\sigma - u) \tan \phi_m = 0$ 时，土体结构面的抗剪强度等于岩土体的黏聚力，边坡体处于临界状态，危险性较高。

当降雨强度较大时，岩土体内部水分增加，还将产生渗流静水压力和渗流动水压力。其中，边坡土体会在动水压力的作用下不断流失，导致边坡的稳定性降低。同时，静水压力会让岩土体长期处于水的浸泡之中，土体的抗剪强度随之降低，抗滑力下降。

2) 土体的膨胀作用

边坡内部土体水分的增加会使土体产生膨胀，土体产生侧向的膨胀力，水平受力增大，边坡土体在降雨后可能会造成土体的胀裂，导致边坡土体滑动。

3) 软化和泥化作用

岩土体的强度主要由结构面控制，结构面的物理性质会因降雨入渗而发生改变，随着入渗雨量的不断增加，结构面的强度不断下降。在顺层边坡中，结构面在雨水入渗作用下的强度会大大降低，严重影响边坡的稳定性。

另外，雨水对岩土体存在软化和泥化作用，有关试验结果表明：长期浸泡在水中会使岩土体的力学性质降低，黏聚力和内摩擦角都会随着雨水浸泡时间的增长而不断减小。

4) 润滑作用

雨水渗入至结构面，会在结构面上产生一定的润滑效应，降低结构面的摩阻力，使边坡体的下滑力增加。

5) 冲蚀和溶蚀作用

在雨水入渗过程中，当雨水还未完全渗入至边坡内部时，会在坡体表面产生冲蚀作用，使边坡表面的土体发生破坏。雨水中含有多种成分，一些成分可以使岩土体内部的可溶性盐溶解，使边坡体内部形成因溶蚀作用而产生的空隙、裂缝等，破坏岩土体的完整性，最终导致边坡的失稳破坏。

2.3. 边坡降雨入渗过程

降雨入渗过程是十分复杂的，降雨入渗过程包括雨水沿坡顶面的渗入、沿坡面的渗入、沿坡体裂隙

的渗入等多种形式。

当边坡土体的渗透系数较大时，雨水很容易入渗到边坡内部的岩土体中，使得边坡土体中地下水得到充分补充；当边坡土体的渗透系数较小时，雨水入渗困难，此时降雨会在边坡体表面形成径流，对边坡表面土体造成较大的冲刷作用。

雨水随时间的入渗，使边坡内部土体经历了从非饱和状态向饱和状态不断发展变化的过程。这一过程受到降雨强度、降雨时间、边坡的岩土体渗流特性等因素的影响。不同渗透性能岩土体的降雨入渗决定因素不同，雨水入渗的不同阶段也会表现出不同的渗透特性。在降雨过程中，典型的含水率分布剖面可以分为以下四个区：饱和区、过渡区、传导区和湿润区，其中，湿润区的前缘一般称为湿润锋。

以上四个分区的特点如下：

- 1) 饱和区：该区域各处岩土体均达到饱和状态，区域厚度较小，一般仅几毫米厚。
- 2) 过渡区：该区域的含水率随着深度的增加逐渐降低，该区域厚度一般为几厘米。
- 3) 传导区：该区域岩土体的含水率随深度的增加变化较小，该区域厚度较大，含水量高。
- 4) 湿润区：该区域内岩土体的含水率随深度的增加迅速下降，并最终接近初始的含水量值。
- 5) 湿润锋：一般指的是岩土体中干燥土体和湿润土体之间的一个接触面。

一般情况下，雨水入渗开始时，地层的含水率较低，基质吸力较大，雨水入渗能力强，而随着降雨持续时间的增长，地层的含水量增加，基质吸力降低，最终达到降雨入渗的稳定。由于边坡在降雨作用下的失稳破坏并不一定出现在水位抬高到某一高度时才发生，所以降雨入渗过程应该得到足够的重视。

3. 降雨渗流边界条件

分析模型的边界条件是数值模拟分析的一个重要条件，数值问题求解是对边界条件的直接响应。有时候边界条件的定义是比较简单的，有的边界条件则比较复杂，需要仔细反复的思考，认真的研究边界条件的设置。上面方程是饱和和非饱和土渗流的控制方程，但是方程中的参数我们难以确定，所以不能为控制方程做出解答。一般渗流问题数值计算边界分为两类，第一类是给定水头边界，这种边界常见在地表水与渗流区域的连接处，每时刻水头 h 是给定的，即：

$$h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = \varphi(x, y, t) \quad (x, y \in \Gamma_1, t > 0) \quad (3)$$

第二类为给定流通量边界，它是通过给定流过单元边的水流速率，例如入渗或者降雨速率，求解有限元方程单位速率时，就必须沿着这个单元边进行积分，并且将这个单元流速 q 转化为节点流量 Q ，即：

$$\left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \cos(n, y) \right]_{\Gamma_2} = q(x, y, t) \quad (x, y \in \Gamma_2, t > 0) \quad (4)$$

还有常见的几种数学边界：纽曼边界、不确定边界、柯西边界、狄利克雷边界。在渗流分析中水头是基本未知量或场变量，在一个节点上给定场变量的边界条件有时候也被称为狄利克雷边界。水流梯度边界有时也会称作为纽曼边界。在渗流分析中，只有水头或者流量可以作为边界条件给定，但是有些情况水头和流量是未知的，经常遇见的情况是库水位骤降后，在上游面的渗流发展。在渗流面上的孔隙水压力为零，并不是所有时间都是这样指定的，因为一个 $P=0$ 的情况同样反映出潜水面的位置，有可能在不经意间变成一个水源。渗流面存在这另外一个问题就是渗流面的位置可能不知道，因此这也是求解的一部分，需要通过一个迭代过程来确定。在一个瞬态分析中，潜在渗流面上的节点在每个时步开始都要设置为流量边界条件，这包括在以前时间步里转化为水头型边界条件的所有节点，检查节点上的流量设置初始值。

4. 边坡降雨入渗基本理论

4.1. 边坡降雨入渗过程

在降雨丰富的地区，降雨是诱发自然斜坡或者人工边坡滑坡的重要因素，尤其是雨季，降雨诱发公路边坡滑坡的概率和数量都明显增加。在边坡降雨期间，由于岩土体渗透能力有限，边坡入渗的雨水量和入渗深度是有限的，形成表层暂态饱和区和地表径流，一般而言，坡表面饱和区域很难贯通延伸至地下水位线。此时边坡内部可分为坡面浅层饱和区、水位线下饱和区以及受降雨影响较小的非饱和区。因此，水从边坡表面渗流到地下潜水位，在此过程中发生饱和 - 非饱和渗流，既有表层暂态饱和区岩土体的饱和渗流，也有非饱和区岩土体的非饱和渗流。雨水入渗下坡体内不同深度位置的体积含水量不同，可分为：饱和带、过渡带、传导带和湿润带，其中湿润带前端，即湿润锋。

由降雨强度与降雨历时控制的持续降雨，雨水向坡体内部渗流，非饱和区基质吸力因含水量不断增加而逐渐减小，非饱和抗剪强度下降。降雨条件下，非饱和坡表面岩土逐渐饱和，最终形成暂态饱和区，此时暂态饱和和非饱和区增加的容重，增大了表层潜在滑体的载荷，因此边坡岩土体下滑力增加。同时随着降雨的持续，地下水位线逐渐上升，地下水位线下饱和区范围逐渐增加，岩土因原位置的孔隙水压上升，导致有效应力逐渐下降，抗剪强度降低。

影响降雨型边坡稳定性的三大关键因素，即降雨方式、降雨强度和岩土渗透能力，前三者直接影响边坡雨水入渗强度。当降雨强度远小于岩土体渗透能力时，因此入渗强度也是降雨强度大小。随后岩土体含水率因持续降雨逐渐增加，其渗透能力逐步变小。当降雨强度大于岩土体渗透能力时，土体渗透能力决定雨水入渗强度，不能继续渗入坡面内的雨水最终形成表面径流。此时，受岩土渗透能力控制的雨水入渗强度逐渐降低并趋于达到一个常数，即饱和渗透系数，此时岩土体含水率趋于达到饱和含水率定值，最终形成边坡稳定入渗。边坡降雨入渗过程中，边坡内部会形成不断下移的湿润层，坡体内基质吸力逐渐降低。暂态饱和区也会随湿润层向下移动，暂态饱和区分布范围会逐步扩大，最终形成稳定的地下渗流。

4.2. 饱和 - 非饱和渗流理论

1852 年~1855 年法国科学家 Darcy 利用装满沙子的圆筒装置，对砂柱的渗透性进行了实验，通过该实验得到饱和状态砂柱中宏观水的流动规律，即：

$$Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (5)$$

式中： Q ——渗流量；

H_1 ——水流过砂柱前水头；

H_2 ——水流过砂柱后水头；

L ——砂沿水流方向长度；

A ——圆管横截面积；

K ——比例系数(渗透系数)。

该公式中 $\frac{H_1 - H_2}{L}$ 又称水力梯度 J ，故可改写成：

$$v = \frac{Q}{A} = KJ \quad (6)$$

也可表达成一维运动的微分表达形式：

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{dH}{ds} \quad (7)$$

$-\frac{dH}{ds}$ ——水力梯度； J_v ——断面渗流速度； dH ——饱和渗流水头差； dL ——渗流路径长度； k ——饱和渗透系数，此公式将渗流速度 v 投影到三维坐标系 x 、 y 、 z 轴，可推广到三维水流运动：

$$v_x = -K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (8)$$

$$v_y = -K \frac{\partial H}{\partial y} \quad (9)$$

$$v_z = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (10)$$

$$v = v_x i + v_y j + v_z k \quad (11)$$

公式中： i 、 j 、 k 三维坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴的单位矢量，由上式可知，基于位置坐标 (x, y, z) 的水头函数 $H(x, y, z)$ 给出时，可计算三维渗流场的某一点处的渗流速度 v 上述公式为 Darcy 定律，描述饱和岩土体渗流规律，其中渗透速度 v 与水力梯度 J 成线性比例关系，比例系数 K 又称渗透系数，在饱和土中是常数。同时 Darcy 定律也适用于非饱和土，但渗透系数是岩土体含水量和基质吸力相关的函数，不再是一个常数。基于 Darcy 定律，认为导水率(渗透系数)是渗透系数是不饱和岩土体基质势 h 或含水量 θ 函数，提出非饱和渗流计算公式：

$$v = k(h) VH \text{ 或者 } v = k(\theta) VH \quad (12)$$

式中 VH ——非饱和流场中总水势梯度。

$k(h)$ 、 $k(\theta)$ 导水率或渗透系数，与基质势 h 或含水量 θ 相关在二维空间选取无限小的岩土单元体，其长度分别是 dx 和 dy ，水流沿着坐标轴 x 和 y 方向流动，则水流流入与流出微小单元体的体积差：

$$v_x + dv_w - v_w = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) dx dy dt \quad (13)$$

单元体含水量为 $\theta dx dy$ (θ ——体积含水率)，在不考虑渗流作用下岩土体骨架压缩变形条件下，单位时间内含水量变化值，见公式(3.7)，流入、流出单元体体积差，也即是单元体内含水量变化值：

$$dv_w = \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dy dt \quad (14)$$

$$dv_w = d\theta \quad (15)$$

可简化得到：

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (16)$$

将达西定律 $v_x = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x}$ 以及 $v_y = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial y}$ 代入公式，即得到非饱和渗流微分方程：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right] \quad (17)$$

岩土体的体积含水率，可表示成：

$$d\theta = -m_1^* d(\sigma - u_a) - m_2^* d(u_a - u_w) \quad (18)$$

式中: σ ——总应力; u ——孔隙气压力; u_w ——孔隙水压力; m_1^w 法向应力—— u 所确定的体积变化参数; m_2^w 基质吸力 $u_a - u_w$ 确定的水体积变化参数。

Fredlund 和 Morgenstern 具体描述非饱和土应力状态时, 提出的法向应力 $\sigma - u_a$ 和基质吸力 $u_a - u_w$ 双独立变量, 共同影响岩土体含水率。同时坡体内雨水渗流过程中, 不考虑作用于边坡的外部荷载, 认为非饱和状态下土体中孔隙气压力保持不变, 既有:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0, \frac{\partial u_a}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -m_1^w \frac{\partial(\sigma - u_a)}{\partial t} - m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \quad (20)$$

将上式带入下公式, 可得出:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial v_y}{\partial y} \left[k(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = -m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \quad (21)$$

由 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = -m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t}$ 反推出土水特征曲线斜率:

$$m_2^w = \frac{\partial \theta}{\partial(u_a - u_w)} \quad (22)$$

渗流过程中总水头:

$$h = z + \frac{u_w}{\rho g} = z + \frac{u_w}{\rho g} \quad (23)$$

式中: h 总水头 z 位置水头 $\frac{u_w}{\rho g}$ ——压力水头 r_w ——水的重度(ρg)。

由于 $\frac{\partial}{\partial x} = 0, \frac{\partial u_a}{\partial t} = 0$, 同时(3.22)中可用 h 代替:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \rho g m_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (24)$$

式中: h 表示岩土体总水头, k_x 与 k_y ——岩土体 x 、 y 方向渗透系数 ρ 表示水的密度; g 表示重力加速度; m_w ——比水容量或土水特征曲线斜率; t ——渗流时间。根据以上分析, 可得出饱和 - 非饱和渗流微分方程(2.18)与(2.19): 饱和和渗流微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = 0 \quad (25)$$

非饱和和渗流微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \rho g m_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (26)$$

4.3. 土水特征曲线

岩土体自身力学性质受基质吸力影响, 而含水量直接影响着基质吸力。在非饱和土中, 土水特征曲线是被用以描述基质吸力 $u - u_w$, 与岩土体含水量日之间变化趋势的曲线关系, 确定该曲线方法有试验法和经验拟合法, 由于试验法中达到平衡状态的试样耗时长, 使用试验方法确定土水特征曲线具有一定的

难度和周期长, 试验仪器为压力板仪、Tempe 仪和联合测试系统。针对试验法不足, 众多的学者针对非饱和土的土水特征曲线特点开展研究, 并得出拟合的土水特征曲线, 即经验拟合法, 该方法可在现场试验资料缺乏的条件下快速拟合确定土水曲线。经验拟合法所确定的土水特征曲线模型包括:

1) Gardner (1956)模型:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha \Psi^n} + \theta_r \quad (27)$$

式中: θ ——表示体积含水率, θ_s ——表示残余含水率, θ_r ——表示饱和含水率, w ——非饱和基质吸力, k ——饱和渗透系数, a , n ——土水特征曲线形状参数, 其中参数 a , 跟空气进气值的倒数有关, 参数 n , 跟颗粒的孔径分布有关。

2) Brooks 和 Corey (BC)模型:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{\Psi}{\Psi_b} \right]^{-\lambda} + \theta_r \quad (28)$$

式中: Ψ_b ——与空气进气值相关参数, λ ——非饱和土孔径系数。

3) Van Genuchten (VG)模型:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m} + \theta_r \left[m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1 \right] \quad (29)$$

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (30)$$

式中: k ——饱和渗透系数, a , m , n ——土水特征曲线参数。

4) Fredlund 和 Xing (FX)模型:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \frac{C(\Psi)}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (31)$$

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\Psi_r} \right)} \quad (32)$$

式中: a , m , n ——与 FX 模型拟合参数与 VG 模型拟合参数类似, e ——自然底数, $C(\Psi)$ ——基质吸力相关修正因子, w ——残余含水量状态下基质吸力。

4.4. 饱和非饱和抗剪强度理论

1943 年太沙基提出了有效应力原理, 并依据岩土体的 Mohr-Coulomb 强度准则(3.22), 可得到饱和状态下岩土体抗剪强度 τ_f

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (33)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (34)$$

式中： τ ——抗剪强度， c ——剪强有效粘聚力， σ ——破坏面正应力， u_w ——孔隙水压力 σ' 破坏面有效正应力 $(\sigma - u_w)\phi'$ 有效内摩擦角公式表达岩土体饱和抗剪强度，实际上土体一般有着三相性，当存在除了水、固两相外的气相时，未考虑非饱和状态下岩土体的基质吸力对抗剪强度影响。国内外众多学者针对上述公式只适用于饱和岩土体这一不足，提出考虑基质吸力的非饱和土抗剪强度计算公式。1963年，Bishop 研究了非饱和土体的抗剪强度，并提出非饱和土抗剪强度基本公式，表示如下：

$$\tau = c' + [(\sigma_n - \mu_a) + X(\mu_a - \mu_w)] \tan \phi' \quad (35)$$

式中： τ ——非饱和土抗剪强度 $\sigma_n - \mu_a$ ，剪切滑裂面净法向应力。 $\mu_a - \mu_w$ 剪切滑裂面上基质吸力 ϕ' ——有效内摩擦角 c' ——有效粘聚力 X (完全干燥状态) 0~1 (完全饱和状态) 有效应力参数，与岩土体类型、饱和度、应力路径相关。

Bishop 等人提出的非饱和抗剪强度公式中的有效应力参数 X ，存在着理论以及实验测定复杂且困难的问题。根据 Bishop 研究成果，1979年 Fredlund 和 Morgenstern 为解决这一问题，提出净正应力 $(\sigma_n - \mu_a)$ 和基质吸力 $(\mu_a - \mu_w)$ 独立变量，具体描述非饱和应力状态，即：

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu_a) \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad (36)$$

式中： c' ——有效粘聚力， ϕ' 内摩擦角，与法向应力相关 $\sigma_n - \mu_a$ ——剪切破坏面的净正应力。 $\mu_a - \mu_w$ ——基质吸力 ϕ^b ——内摩擦角， μ_a 与基质吸力相关。 μ_w ——孔隙气压力从， τ ——孔隙水压力， σ_n ——破坏面法向总应力。

上式中按 $\mu_a = 0$ 和认为 ϕ^b 为常数进行整理，可得出：

$$\tau_f = (c' - u_w \tan \phi^b) + \sigma \tan \phi' = c'' + \sigma \tan \phi' \quad (37)$$

$$c'' = c' - u_w \tan \phi^b \quad (38)$$

c'' ——非饱和等效粘聚力。

5. 结论

降雨入渗过程是十分复杂的，降雨入渗过程包括雨水沿坡顶面的渗入、沿坡面的渗入、沿坡体裂隙的渗入等多种形式。降雨对边坡稳定性的影响、降雨渗流边界条件和边坡降雨入渗基本理论三个方面还应进行深入的研究。

基金项目

山东省交通运输厅科技计划(黄河流域河滩高地地貌高速公路典型边坡破坏特征及生态防护优化技术研究)。

参考文献

- [1] 陈晓宇. 降雨和地震条件下山区高速公路泥岩路堑边坡稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [2] 陶伟. G318 波林段典型砂性土边坡稳定性与降雨阈值研究[D]: [硕士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
- [3] 杨煜, 何忠明, 王保林, 等. 不同降雨条件下含软弱夹层土坡渗流特性数值分析[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 15-19.
- [4] 武娜. 高陡边坡岩体渗流演化机制初探——以大岗山水电站右岸边坡为例[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] 张太雄. 高速铁路黄土路堑高边坡稳定性分析及变形规律研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

- [6] 刘力璇. 缓倾泥岩顺层公路边坡的稳定性分析及风险评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [7] 黄浩. 降雨对福建地区残积土边坡稳定性影响的监测与分析[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [8] 许旭堂, 简文彬. 土坡前端推力对降雨入渗响应的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3547-3554.
- [9] 魏刚强. 降雨和地震作用下炭质页岩路堑边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- [10] 郁舒阳, 张继勋, 任旭华, 等. 降雨类型对浅层深层滑坡渗流及稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 123-127.
- [11] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 38-42.
- [12] 马吉倩, 付宏渊, 王桂尧, 等. 降雨条件下成层土质边坡的渗流特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 464-471.
- [13] 童立. 降雨条件下含夹层公路边坡渗流特性分析[J]. 公路, 2021, 66(6): 37-42.
- [14] 赵江. 路基路面在降雨条件下渗流分析及边坡稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [15] 王韶鹏. 填方路基的雨水入渗及设计优化研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [16] 郁伯铭. 多孔介质输运性质的分形分析研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 333-346.
- [17] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(4): 419-426.
- [18] Zhang, H.Z. and Fang, Y. (2014) An Experimental Study on Flexural-Tensile Property of Cement Stabilized Coal Gangue Roadbase Materials. *Applied Mechanics and Materials*, **638-640**, 1536-1540. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.638-640.1536>
- [19] Zhang, R., Wang, D., Zhang, Y., *et al.* (2018) Effects of Green Substrates Composed of Coal Gangue on the Growth of *Trifolium repens* L. and Its Resistance to Heavy Metal Pollution. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, **24**, 908-914.
- [20] Wang, Y., Zhang, Y., Zhou, Q., *et al.* (2018) Thermal Kinetics Analysis of Coal-Gangue Selected from Inner Mongolia in China. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **131**, 1835-1843. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6642-4>