

土石混合体的潜蚀过程

蒋先刚¹ 冉芮绮¹ 张宗亮²

(1.四川农业大学土木工程学院, 四川成都 611830; 2.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司 云南昆明 650000)

摘要: 土石混合体由粗颗粒和细颗粒组成。细颗粒极易在渗流的作用下发生潜蚀。现有的潜蚀模型无法定量分析土石混合体潜蚀过程中各粒组的演化, 不能全面理解潜蚀过程中土体参数的变化。本文通过对颗粒进行受力分析, 推导了土颗粒运移的临界条件及运移颗粒的质量, 得出了潜蚀过程中定量计算任意时刻土体级配的方法。并耦合渗流控制方程和孔隙率方程, 建立了可量化分析土石混合体各粒组质量变化的潜蚀模型。结合实验数据验证了所建模型的可行性和准确性。通过所建模型预测土石混合体在潜蚀过程中各粒组质量的变化, 进而获得土体干密度和孔隙率的变化。该研究实现了土石混合体潜蚀过程中各粒组的量化分析, 进一步揭示了土石混合体的潜蚀机制。

关键词: 潜蚀, 土石混合体, 渗流, 粒组

中图分类号: TU43

收稿日期: 2025-02-13

The Suffusion Mechanism of Soil-Rock Mixtures

Xiangang Jiang¹ Ruiqi Ran¹ Zongliang Zhang²

(1. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China; 2. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, 650000, China)

Abstract: Soil-rock mixtures are composed of coarse particles and fine particles. The fine particles are under the action of seepage flow, resulting in suffusion. The existing suffusion models are unable to quantitatively analyze the evolution of each grain group during the suffusion process of soil-rock mixtures and cannot comprehensively understand the changes in soil parameters during the suffusion process of soil-rock mixtures. Therefore, in this paper, through the analysis of the force balance of particles, the critical conditions for the migration of soil particles and the mass of the migrating particles are deduced, and a method for quantitatively calculating the soil gradation at any time during the suffusion process is obtained. Moreover, by coupling the seepage flow control equation and the porosity equation, a suffusion model that can quantitatively analyze the mass changes of each grain group of soil-rock mixtures is established. The feasibility and accuracy of the established model are verified in combination with experimental data. Through the established model, the changes in the mass of each grain group of soil-rock mixtures during the suffusion process can be predicted, and furthermore, the changes in the dry density and porosity of the soil mass can be obtained. This research realizes the quantitative analysis of each grain group during the suffusion process of soil-rock mixtures and further reveals the suffusion mechanism of soil-rock mixtures.

Key words: suffusion, soil-rock mixture, seepage flow, fraction

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42177149);中国电力建设股份公司科技项目(DJ-ZDXM-2019-45)。

第一作者: 蒋先刚(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害形成机理及防治方面的工作。ORCID:0000-0001-9403-118X.E-mail: jxgjim@163.com.

0 引言

土石混合体由粗粒和细粒颗粒组成,在自然界和工程中极为常见。在降雨、灌溉和水库水位的作用下,土石混合体容易发生潜蚀(Deng et al.,2024)。发生潜蚀后,土石混合体的物质组成、土体结构及其相关特性将发生变化,可能导致土体破坏甚至引发相应地质灾害(周超等,2023;张永双等,2023)。

对于土石混合体的潜蚀过程,一般是通过观察和分析颗粒迁移过程和潜蚀特性进行研究。例如, Terzaghi(1943)根据对渗流实验的观察和结果分析,提出只有在一定的临界水力梯度下,土体中的细颗粒才会沿渗流方向迁移。Skempton and Brogan(1994)通过土体潜蚀实验,分析了水力梯度对潜蚀过程的影响。Moffat and Fannin(2006)通过渗流实验研究了多种级配下的土石混合体的渗流和潜蚀过程,以及相关参数的演变特征。雷小芹等(2021)通过数值实验研究了降雨条件下边坡内细颗粒流失情况,以及对边坡稳定系的影响。Ouyang and Takahashi(2015)关注细颗粒含量对潜蚀过程和土壤结构演变的影响。研究表明,在实验中,含有大量细颗粒的混合土体会有更强烈的潜蚀响应和更大的体积应变。

潜蚀模型是通过联立相关方程分析土体参数的变化来预测潜蚀过程。李喜安等(2010)从物理机制上给出了潜蚀的概念模型。潜蚀的数学模型可分为宏观模型和微观模型。对于宏观模型, Sterpi(2003)提出了潜蚀率与水力梯度的关系,并建立了相关模型研究了潜蚀,进而分析细颗粒迁移量。Cividini and Gioda(2004)提出了一种描述潜蚀过程中土体密度变化的方法,并建立了数学模型来预测潜蚀过程。在细观方面, Golay and Bonelli(2011)认为潜蚀发生在土壤颗粒与流体的接触面。他们利用虚拟域法计算了颗粒周围Stokes流的运动,并通过Level-Set函数模拟了渗流和潜蚀过程中流体-土颗粒界面处孔隙尺度的变化。然而,上述模型中的潜蚀速率仅与渗流速度有关,模型中的一些参数难以确定,如长期密度。此外,这些模型都认为颗粒在达到一定流速时可以运动,而忽略了孔道大小对颗粒运动的影响。因此,利用上述模型难以定量分析潜蚀过程中土体级配的变化。

本文通过力学推导,重新获取了潜蚀条件下颗粒运移的临界条件,得出了运移颗粒质量计算,导出了任意时刻颗粒级配分析方法,并耦合渗流方程

和孔隙率方程,构建土石混合体的潜蚀模型。通过该模型可以量化土石混合体各粒组的变化,确定土石混合体潜蚀过程中的各参数的值,为深入理解潜蚀机理提供依据,亦为防治潜蚀灾害提供一定的理论参考。

1 土石混合体潜蚀模型

1.1 非饱和和渗流方程

这里使用以下二维理查兹方程来描述渗流过程(Fredlund and Rahardjo,1993)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (1)$$

其中 k_x, k_y , 和 k_z 是在 x, y , 和 z 方向的渗透系数, m/s; H 总水头, m; θ 是含水量; u_w 为孔隙水压力。

1.2 非饱和和土水力特性方程

由于Van Genuchten-Mualem模型可以用来描述绝大部分类型土体的水力特性,故本文在土体的非饱和阶段会采用Van Genuchten-Mualem土水特征曲线方程和非饱和渗透系数方程(Van Genuchten,1980)。

土水特征曲线方程可表示为:

$$\theta_w = \begin{cases} \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left\{1 + [\alpha_w(u_a - u_w)]^{n_w}\right\}^{m_w}} + \theta_r & (u_w < 0) \\ \theta_s & (u_w \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_w 为体积含水率, θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为剩余体积含水率; u_w 为孔隙水压力; u_a 为孔隙气压力。因本次模拟假设了土体的孔隙通道和大气相通,故 u_a 取值为0; α_w 是和进气值的倒数相关的参数; n_w 是表示当土体超过进气值之后和土水特征曲线的斜率相关的参数,表示非饱和土含水率变化的快慢; m_w 是和残余状态相关的模型参数,表示为和 n_w 相关的计算式,为 $m_w = 1 - 1/n_w$ (Mualem,1976)。

非饱和渗透系数 k 可以表示为(张磊等,2014):

$$k = k_s \frac{\left\{1 - (-\alpha_w u_w)^{n_w-1} \left[1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}\right]^{-m_w}\right\}^2}{\left[1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}\right]^{m_w/2}} \quad (3)$$

式中: k_s 代表饱和渗透系数。而 k_s 又可以表示成与孔隙率、初始饱和渗透系数有关的函数(张磊等,2014):

$$k_s = \frac{n^3}{(1-n)^2} \times \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} k_{s0} \quad (4)$$

式中： n_0 为土体的初始孔隙率； k_{s0} 为土体的初始饱和渗透系数。

1.3 颗粒移动临界条件

1.3.1 粒径与孔径的关系

潜蚀过程中细颗粒的运移是由各种力引起的。颗粒在土体中运动的通道如图1所示。该通道与水流方向平行。最小孔径可表示为(Indraratna and Radampola,2002):

$$d_0 = 2.67 \frac{n}{1-n} \frac{D_h}{\alpha_h} \quad (5)$$

其中 n 孔隙率; α_h 是形状系数, 对于球形物体取6 (Kovács,1981); D_h 是等效颗粒直径, 计算如式(6)所示:

$$D_h = \frac{1}{\sum \frac{\Delta S_i}{d_i}} \quad (6)$$

在方程式(6)中, S_i 是第 i 个颗粒组的重量除以样品的总重量, d_i 是第 i 个颗粒组的平均粒径(如图2所示)。

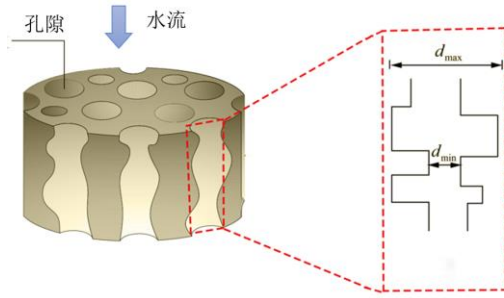


图1 土体内孔隙通道和最小孔隙直径

Fig.1 Pore channels within the soil mass and the minimum pore diameter

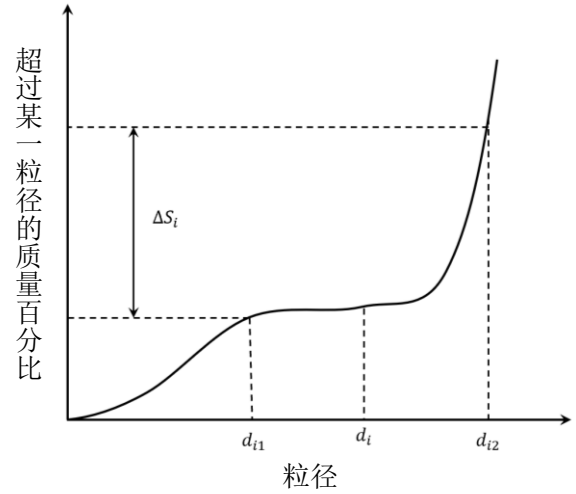


图2 等效粒径计算示意图

Fig.2 Schematic Diagram for the Calculation of Equivalent Particle Size

土颗粒是否移动, 首先要确定颗粒大小与最小孔隙之间的关系, 然后再确定颗粒是否满足其他条件。粒径与最小孔径之间存在以下三种关系:

- (1) 土颗粒的直径小于最小孔径;
- (2) 土颗粒粒径等于最小孔径;
- (3) 土颗粒直径大于最小孔径。

1.3.2 颗粒迁移条件

这部分将根据土颗粒粒径和最小孔径之间的三种情况进行讨论。

土壤颗粒受到水压力和粘性阻力, 以及重力、浮力和摩擦阻力(图3和图4)。

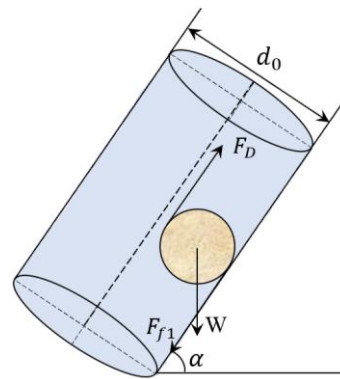


图3 颗粒粒径小于孔隙直径时的颗粒受力示意图(向上渗流时)

Fig.3 Schematic Diagram of Particle Forces when the Particle Size is Smaller than the Pore Diameter (during upward seepage)

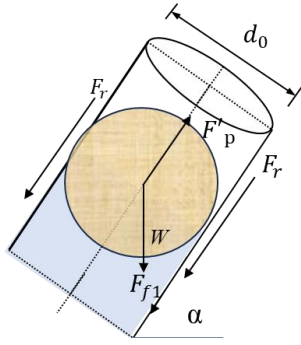


图4 颗粒粒径等于孔隙直径时的颗粒受力示意图（向上渗流时）

Fig.4 Schematic diagram of particle forces when the particle diameter is equal to the pore diameter (during upward seepage)

首先，土颗粒粒径小于孔的最小直径 ($d_i < d_0$)。

F_D 是土颗粒所受到的渗透力，计算公式如下 (Wörman and Olafsdottir, 1992):

$$F_D = \frac{e}{8} d^3 \gamma_w J \quad (7)$$

其中， d 颗粒粒径； γ_w 是水的容重； e 为孔隙比； J 是水力梯度，可通过式(1)-(4)计算出总水头差与渗流路径的比值而得到。

摩擦力 F_{f1} 通过下式计算

$$F_{f1} = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_s - \gamma_w) \cos \alpha (f) \quad (8)$$

其中 α 为孔隙通道与水平面的夹角， f 是摩擦系数， W 是土颗粒水下重量，为

$$W = \frac{1}{6} \pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w) \quad (9)$$

其中 γ_s 土颗粒容重。

临界条件下土颗粒受力平衡示意图如图3所示。根据示意图分析，可以得出向上渗流条件下孔隙中颗粒的极限平衡方程为：

$$F_{f1} + W \sin \alpha - F_D = 0 \quad (10)$$

把式 (7) 至(9) 带入至式 (10) 中可得临界水力梯度 i_{cr} :

$$i_{cr} = \frac{4\pi(\gamma_s - \gamma_w) [\cos \alpha (f) + \sin \alpha]}{3a_s e \gamma_w} \quad (11)$$

在向下渗流条件下的受力平衡方程为：

$$F_D + W \sin \alpha - F_{f1} = 0 \quad (12)$$

此时，得到的临界水力梯度条件为 i_{cr} :

$$i_{cr} = \frac{4\pi(\gamma_s - \gamma_w) [\cos \alpha (f) - \sin \alpha]}{3a_s e \gamma_w} \quad (13)$$

第二种情况是，当粒径等于孔的最小直径 ($d_i = d_0$) 时。临界条件下孔隙中颗粒如图4所示。这种情况相当于颗粒“堵塞”了孔隙通道，除了摩擦力 (F_{f1}) 外，还需要考虑颗粒表面与孔壁间的摩擦力 (F_r)。在这种情况下，水流不能穿过颗粒到达堵塞通道的颗粒前方，因此此时不需要考虑水流的阻力，但在水流的压力 F'_p 下，假设一半的土颗粒在水中，该压力为

$$F'_p = \frac{e}{16} \pi d^3 \gamma_w J \quad (14)$$

F_r 是由侧向土压力引起的颗粒和孔壁之间的接触摩擦力，表示为：

$$F_r = \sqrt{F_{zx}^2 + F_{xz}^2} \quad (15)$$

$$F_{zx} = 0.5\pi d^2 K (\gamma_s h_s - \gamma_w h_w) \sin \alpha \tan \phi' \quad (16)$$

$$F_{xz} = 0.5\pi d^2 (\gamma_s h_s - \gamma_w h_w) \cos \alpha \tan \phi' \quad (17)$$

其中 h_s 土颗粒以上土层厚度； h_w 是压力水头； ϕ' 是有效内摩擦角，侧压力系数 K 为：

$$K = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (18)$$

且

$$0 < K < \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (19)$$

当渗流向上流动时，土颗粒的受力平衡表达式如下：

$$F_r + W \sin \alpha + F_{f1} - F'_p = 0 \quad (20)$$

因此，当土颗粒粒径等于孔隙的最小直径时，临界水力梯度如下：

$$i_{cr} = \frac{8K(\gamma_s h_s - \gamma_w h_w) \tan \phi'}{e d \gamma_w} + \frac{8(\gamma_s - \gamma_w) [\sin \alpha + \cos \alpha (f)]}{3e \gamma_w} \quad (21)$$

通过同样的方法，可以得出当渗流向下流动时，临界水力梯度为

$$i_{cr} = \frac{8K(\gamma_s h_s - \gamma_w h_w) \tan \phi'}{e d \gamma_w} + \frac{8(\gamma_s - \gamma_w) [\cos \alpha (f) - \sin \alpha]}{3e \gamma_w}$$

(22)

在最后一种情况下，粒径大于最小孔径时，不符合颗粒运移的条件，土颗粒不移动。

上面所述的方程中 α 为孔隙通道倾斜角，当 $\alpha=90^\circ$ 时，土体内为竖直向渗流，当 $\alpha=0^\circ$ 时，土体内为水平向渗流。

综上所述，当判断具颗粒是否可以运移时，它需要满足两个条件。第一个条件是粒径应小于或等于最小孔径($d_i \leq d_0$)。当满足该条件时，确定第二个条件。也就是说，水力梯度大于此处的临界水力梯度($J > i_{cr}$)，土颗粒才可以运移。另外，上述颗粒移动的临界条件会随着颗粒的移动发生变化，亦即是一个动态的临界条件。这是因为土体参数会随着颗粒的移动而发生变化。

1.4 颗粒级配计算方程

土石混合体具有初始的级配、初始总质量(M_0)和初始孔隙率(n_0)。对于颗粒级配曲线，以颗粒的粒径(d_i)作为横坐标，小于粒径 d_i 的颗粒质量占比(y_i)作为纵坐标，其中 i 表示第几个粒径($i=1, 2, 3, 4, 5, \dots$)，当颗粒的粒径为 d_i 时，此粒径颗粒对应的质量占比为 $y_i - y_{i-1}$ (%)。

在颗粒级配分析时，假设若颗粒一旦发生移动，那么发生移动的颗粒会流出土体，且不会在土体内发生淤堵；另外假设土骨架不发生破坏，土体不发生沉降变形。

通过颗粒移动临界条件判断，若粒径为 d_i 的颗粒符合颗粒移动的临界条件，那么土体中粒径为 d_i 的颗粒全部为可移动颗粒。将该时刻所有可移动颗粒的质量求和，即为该时刻移动颗粒质量，令其为 $move_i(t)$ 。

移动颗粒的质量 $move_i(t)$ 将从上一个时间步中的粒径对应质量 $m_i(t - \Delta t)$ 中减去。此时，每个粒径对应的颗粒质量为：

$$m_i(t) = m_i(t - \Delta t) - move_i(t) \quad (23)$$

式中： $m_i(t)$ 为 t 时刻颗粒粒径为 d_i 的土颗粒质量， Δt 为时间步长。

分别将每个粒径对应的剩余质量计算后，相加便可得到当前时刻的土体总质量 $M(t)$ ：

$$M(t) = \sum_{i=1}^c m_i(t) \quad (24)$$

式中： $c=1, 2, 3, \dots$ 。

进而得到每时刻的级配曲线，则级配曲线每个

粒径对应的纵坐标为：

$$y_1 = \frac{m_1(t)}{M(t)} \quad (25)$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{m_i(t)}{M(t)} \times 100\% \quad (26)$$

最后，得到土体干密度 ρ_d ：

$$\rho_d = \frac{M(t)}{V} \quad (27)$$

1.5 孔隙率分析

孔隙率和干密度之间的关系为：

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \quad (28)$$

式中 G_s 为土粒相对密度； ρ_w 为水的密度。

2 数值解法

本文中，方程(1)为非线性偏微分方程，在复杂边界条件下，很难求出解析解，为此，本文采用有限差分法—Alternating direction implicit method (ADI)法进行求解。在差分格式上，采用空间上二阶中心差分，在时间上采用一阶向前差分。通过ADI法求出计算域内全部节点的压力水头、孔隙水压力和垂直方向上的渗流速度，随后根据孔隙水压力的正负求出渗透系数和含水率，继而求出和颗粒移动相关的有效粒径、最小孔道直径和水力梯度。然后对颗粒能否运移进行判断，若满足颗粒移动的条件，那么相应粒径的颗粒被移动，得到可运移颗粒的质量。然后将土体质量减去移动颗粒质量，得到下一时刻土体质量，进而得到剩余土体的干密度，最终得到变化后的土体参数。最后，将得到的相关土体参数作为输入条件，进行下一时刻的循环。主要流程图见图5。

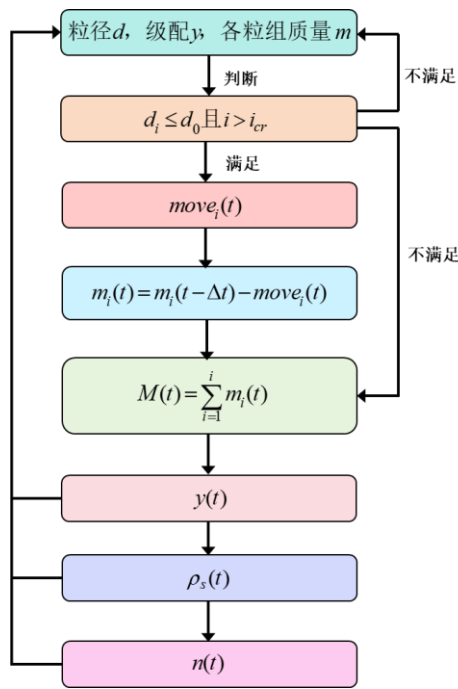


图 5 计算流程图

Fig.5 Calculation Flowchart

3 实验验证

为了验证建立模型的准确性，选取Rochim et al.(2017)和Jiang et al.(2023)等学者开展的土石混合体潜蚀实验进行对比研究，通过分析模型的计算值与实验值的关系，验证所建模型的合理性(Fredlund and Rahardjo,1993;Golay and Bonelli,2011)。

3.1 Rochim et al.(2017)土石混合体渗流潜蚀实验及模型验证

3.1.1 实验条件

整套实验装置由钢制圆筒（用于装置土体）、加压供水系统和水土收集装置组成。土柱试样高10cm，直径为5cm。在实验期间，水流由土柱试样上端流向下端。实验选取级配不同的两种土样。实验中两种土样的物理特性参数如表1所示。实验中土柱上边界水力梯度随时间的关系如图6所示。

表 1 土体参数

Tab.1 Soil Parameters

土样	初始干容重 (kN/m ³)	不均匀系数	初始孔隙率 (%)	初始渗透率 (m/s)	液体密度 (g/cm ³)	实验持续时间 (min)
A-a	17.39	17.06	0.34	1.8×10^{-5}	1.0	270
B90-a	17.39	19.52	0.29	1.2×10^{-5}	1.0	180

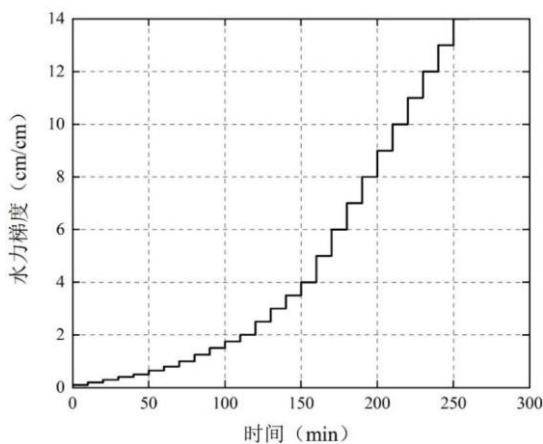


图 6 施加的多级水力梯度

Fig.6 Applied Multi - stage Hydraulic Gradients

3.1.2 数值模型和参数

土柱模型参数如图7所示。土柱的边界条件设置如下：AB和CD边界为无流动边界，颗粒无法在

此处边界自由流出流入；AD边界为施加变水头的边界。BC则为颗粒可以自由流出的出口。材料参数按照表2所示。

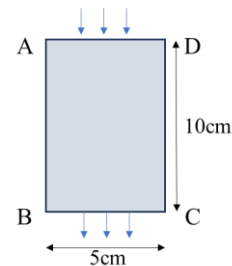


图 7 土柱示意图

Fig.7 Schematic diagram of the soil column example

表 2 潜蚀模型计算参数

Tab.2 Calculation parameters of the suffusion model

参数（单位）	数值
$g(\text{m/s}^2)$	9.8

参数 (单位)	数值
$\rho_w(\text{g/cm}^3)$	1.0
$K_{s0}(\text{cm/s})$	0.09
$\gamma_w(\text{kN/m}^3)$	9.8
f	0.96
$\alpha(^{\circ})$	90

3.1.3 结果分析及模型验证

两种不同级配的土样在相同的变水头情况下土柱上端和下端的级配曲线变化情况如图8和图9所示。由图可知，实验后的试样上下端的颗粒级配曲线均呈现了相似的变化规律，即都保持着最初级配曲线的形状。两种材料的土柱上端级配曲线均在下端级配曲线下方，表明土柱上端受渗流作用细颗粒运移和流失要比下端多。土柱下端的级配曲线与初始时刻级配曲线基本重合，表明土柱下端土颗粒流失很少，这主要是土柱下端水力梯度相对于土柱上端小，造成土柱下端处的水力梯度小于临界水力梯度，而同一时刻，土柱上端处的水力梯度大于临界水力梯度的情况存在。从整体颗粒流失情况看，在变水头条件（水头逐渐增大）下，颗粒流失速率随着时间的增加先增大后减小；结合颗粒级配曲线分析，原因可能是细颗粒在运移过程中出现了堵塞现象，导致运移通道变窄和不通畅造成的。从模型的计算值与实验值的对比情况来看，采用本文所构建模型进行计算后的土柱上、下端的颗粒级配曲线与实测值趋势相同，并且模拟值与实验值基本吻合。这验证了本文所建模型的合理性。

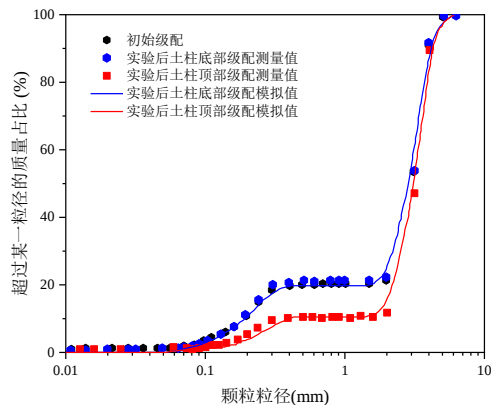


图 8 A-a 土样上下端颗粒级配曲线实验值和模拟值对比
Fig.8 Comparison between Experimental and Simulated Values of Particle Size Distribution Curves at the Upper and Lower Ends of Soil Sample A - a

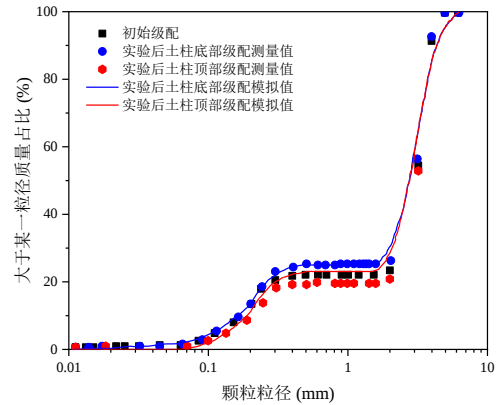


图 9 B90-a 土样上下端颗粒级配曲线实验值和模拟值对比
Fig.9 Comparison between the experimental and simulated values of the particle - size distribution curves at the upper and lower ends of soil sample B90 - a

3.2 Jiang et al.(2023)土石混合体土柱潜蚀实验及模型验证

在这一节，选用Jiang et al.(2023)开展的土石混合体的一维土柱潜蚀实验，对比模型计算结果和实验结果，来进一步验证所建模型的合理性。

3.2.1 实验条件

实验采用圆柱土样。土柱尺寸高为50cm，直径为30cm。为了研究粗颗粒含量对土石混合体潜蚀过程的影响，通过调整粗细颗粒的占比来配置对应的实验材料。实验配置了四种粗颗粒含量不同的土石混合体（48%，52%，70%，80%），四种土石混合体土样的初始颗粒级配曲线如图10所示，且实验材料的干密度均为 1.82g/cm^3 ，土粒相对密度均为2.65，四组实验土样的初始孔隙率为0.32。实验过程中，在土柱下端施加水头，水头随时间变化的关系如图11所示。

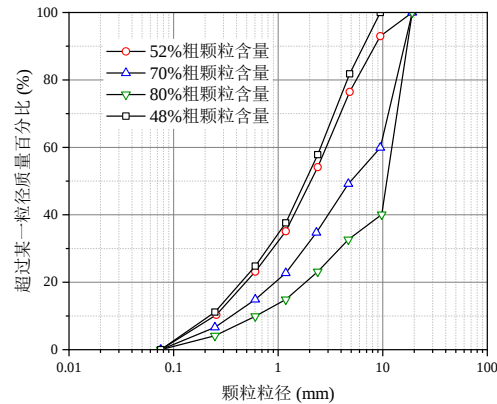


图 10 四种实验材料颗粒级配曲线
Fig.10 Particle size distribution curves of four experimental materials

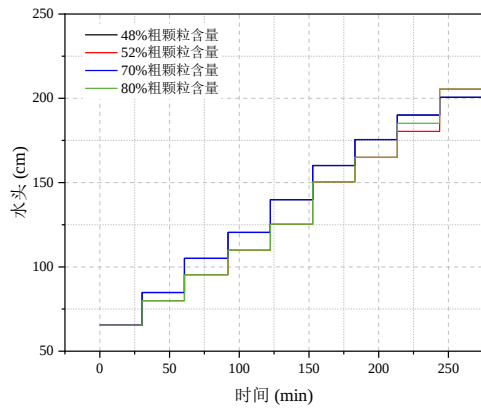


图 11 施加水头情况

Fig.11 Applied Water Head Conditions

3.2.2 数值模型和参数

模型尺寸如图12所示。AB和CD边界为无流动边界，颗粒无法在这两处边界自由流出流入。BC边界为施加变水头的边界。AD为出流边界，颗粒可以从该边界流出。

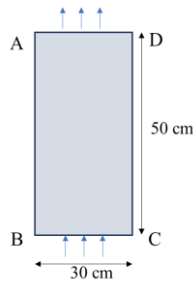


图 12 土柱示意图

Fig.12 Schematic diagram of the soil column example

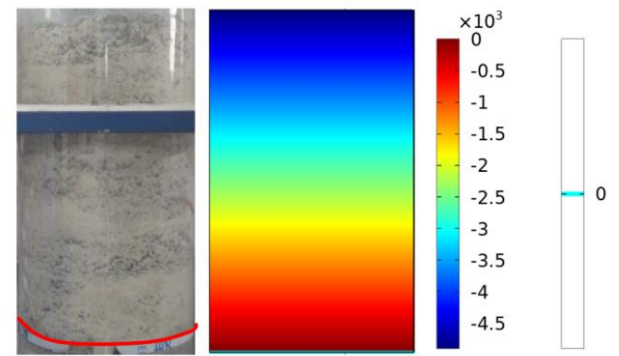
表 3 模型计算参数

Tab.3 Model calculation parameters

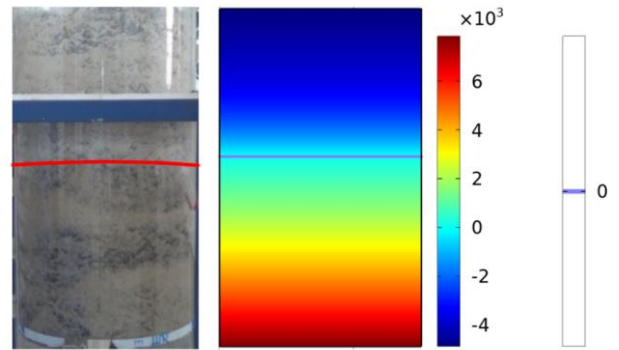
参数 (单位)	数值
n_0	0.32
$\rho_{so}(\text{g/cm}^3)$	1.78
$g(\text{m/s}^2)$	9.8
$\rho_w(\text{g/cm}^3)$	1.0
$K_{so}(\text{cm/s})$	0.09
$\gamma_w(\text{kN/m}^3)$	9.8
$\alpha(^{\circ})$	90

3.2.3 结果分析及模型验证

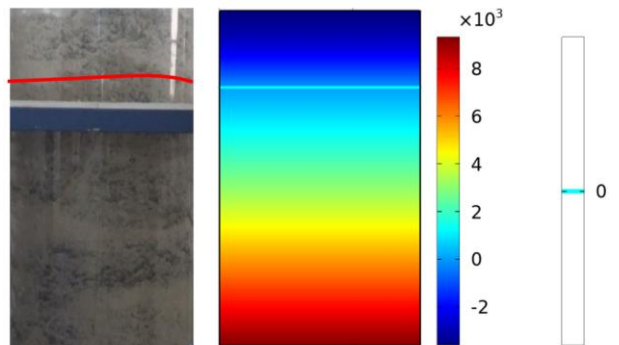
以粗颗粒含量52%的土石混合体材料的实验为例进行分析，土柱的湿润锋变化情况如图13所示。从图中可以看出，随着实验时间的推进，湿润锋逐渐上移，整个土体逐渐趋于饱和，数值模型与实验土柱，在同一时刻两者湿润锋推进的步调几乎一致，证明了模型的准确性。



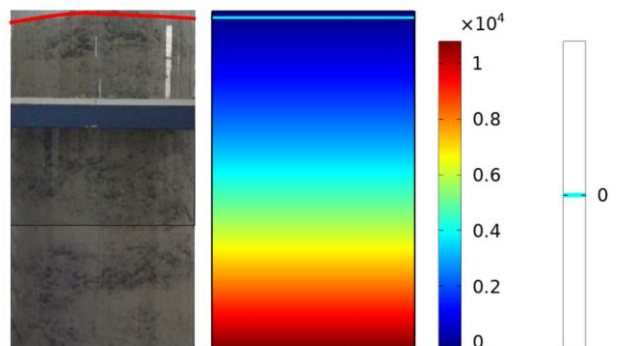
(a) T=0s



(b) T=35s



(c) T=75s



(d) T=105s

图 13 数值模拟与实验的湿润锋高度对比

Fig.13 Comparison of the wetting front height between numerical simulation and experiment

从实验结果上看，土柱顶部（即水流出出口处）随着时间的增加，颗粒流速速率有先增加后减小的趋势，这与Rochim et al.(2017)的实验结果一致。并且，从实验现象上看，土柱顶部的出现“喷冒孔”，其孔径、周围堆积物体积和尺寸在实验后期基本稳定不变，这也说明了实验后期未发生显著流失加剧现象。

四种级配的材料在实验后的孔隙率实验值和计算值对比如图14所示。由图可知，不同粗颗粒含量下的孔隙率计算值均随沿土柱顶部至底部范围内逐渐降低，这与实验值的变化规律一致。四种情况下的计算值与实验值基本接近，并且，四种粗颗粒含量下的孔隙率计算值与实测值间的最大相对误差为4.3%，差值较小，说明了所建模型的计算结果能够作为预测实际值的依据。这也证明了所建模型的合理性。

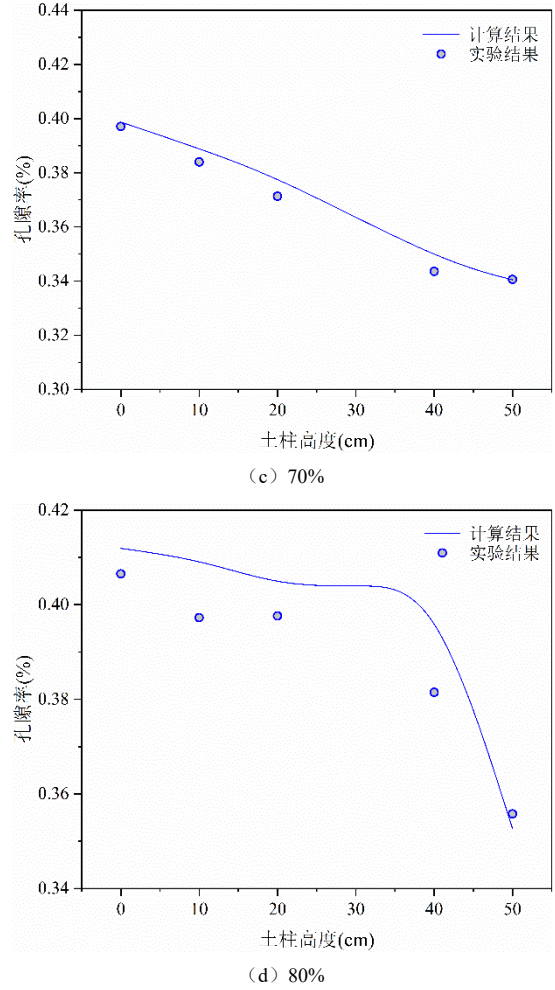
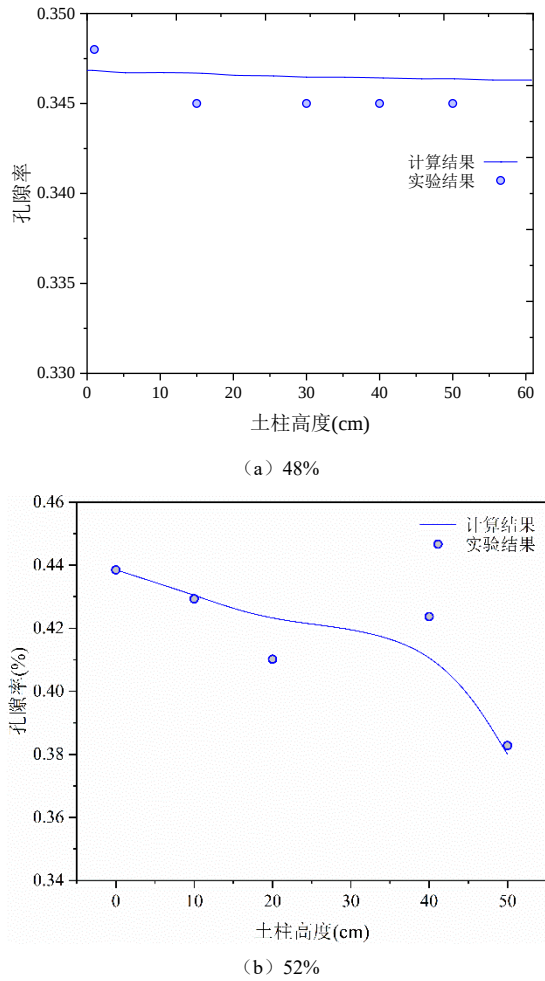


图 14 不同粗颗粒含量土体孔隙率计算结果对比
Fig.14 Comparison of the calculated porosity results of soils with different coarse - grained particle contents

4. 结论

本文推导了潜蚀过程中，土颗粒发生运移的临界条件，研究了发生运移颗粒的质量计算方程，得出了任意时刻土体级配的定量分析方法，建立了土石混合体的潜蚀模型，并结合相应的潜蚀实验，研究了土石混合体潜蚀过程中的相关参数变化规律，验证了所建模型的合理性，揭示了土石混合体的潜蚀机理。结论如下：

(1) 建立了土石混合体材料的颗粒运移的水力判断条件和几何判断条件。几何条件主要通过对比土颗粒理解与孔隙通道直径而建立。水力判断条件，是结合土颗粒与孔隙的关系，综合考虑土颗粒受到的各种力，通过对土颗粒进行受力分析，推导得出了土颗粒发生运移的临界水力梯度，建立了水力判断条件。

(2) 结合颗粒运移发生的临界条件, 推导了潜蚀过程中运移颗粒的质量方程, 并且建立了任意时刻土体颗粒级配计算方法, 可定量分析潜蚀过程中任意时刻土体的颗粒级配。

(3) 结合渗流控制方程、土水力特性方程、颗粒级配计算方程和孔隙率计算方程, 建立了土石混合体渗流-潜蚀耦合模型, 通过此模型可以预测土石混合体潜蚀过程中土体参数的演化。

(4) 通过对比已有文献中的土石混合体潜蚀实验结果, 证实了本文建立的潜蚀模型的合理性。

References

- Cividini, A., Gioda, G., 2004. Finite-element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3): 191-198.
- Deng, Z., Wang, G., Wang, Z., et al., 2024. Modelling Erosion and Stability Degradation of a Reservoir Slope Under Periodic Water Level Fluctuations. *Computers and Geotechnics*, 166: 106021.
- Golay, F., Bonelli, S., 2011. Numerical modeling of suffusion as an interfacial erosion process. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8): 1225-1241.
- Indraratna, B., Radampola, S., 2002. Analysis of Critical Hydraulic Gradient for Particle Movement in Filtration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(4): 347-350.
- Jiang, X., Wörman, A., Chen, X., et al., 2023. Internal Erosion of Debris-flow Deposits Triggered by Seepage. *Engineering Geology*, 314: 107015.
- Lei, X. Q., Liu, E. L., He S. M., et al., 2021. Simulation of Coupled Rainfall-Infiltration Erosion Processes in Unsaturated Fill Slopes. *Engineering Science and Technology*, 53(02): 28-37. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202000001> (in Chinese with English abstract).
- Li, X. A., Huang, R. Q., Peng, J. B., et al., 2010. Discussion on Physical Pipe Erosion and Its Conceptual Model. *Journal of Engineering Geology*, 18(06): 880-886 (in Chinese with English abstract).
- Moffat, R., Fannin, R., 2006. A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 29(4): 273-279.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3): 513-522.
- Ouyang, M., Takahashi, A., 2015. Influence of Initial Fines Content on Fabric of Soils Subjected to Internal Erosion. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(2): 299-313.
- Rochim, A., Marot, D., Sibille, L., et al., 2017. Effects of Hydraulic Loading History on Suffusion Susceptibility of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(7): 04017025.
- Skempton, A. W., Brogan, J. M., 1994. Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3): 449-460.
- Sterpi, D., 2003. Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow. *International Journal of Geomechanics*, 3(1/2): 111-122.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.
- Wörman, A., Olafsdottir, R., 1992. Erosion in a granular medium interface. *Journal of Hydraulic Research*, 30(5): 639-655.
- Zhou, C., Chang, M., Xu, L., et al., 2023. Failure modes and dynamic characteristics of channel dammed bodies in strong earthquake zones. *Earth Sciences*, 48(08): 3115-3126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhang, L. L., Cheng, Y., et al., 2014. Analysis of rainfall infiltration slope stability considering piping effect. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(09): 1680-1687 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Li, J. Q., et al., 2023. The Slippery Geological Structure and High-Position Triggering Mechanism of the Dula Temple Landslide in the Nujiang Tectonic Mélange Belt. *Earth Science*, 48(12): 4668-4679 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 雷小芹, 刘恩龙, 何思明, 等, 2021. 非饱和堆积土边坡降雨-渗流潜蚀耦合过程模拟. *工程科学与技术*, 53(2): 28-37.
- 李喜安, 黄润秋, 彭建兵, 等, 2010. 关于物理潜蚀作用及其概念模型的讨论. *工程地质学报*, 18(6): 880-886.
- 周超, 常鸣, 徐璐, 等, 2023. 强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征. *地球科学*, 48(08): 3115-3126.
- 张磊, 张璐璐, 程演, 等, 2014. 考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析. *岩土工程学报*, 36(9): 1680-1687.
- 张永双, 任三绍, 李金秋, 等, 2023. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制. *地球科学*,

48(12): 4668-4679.