

# 瞬态渗流条件下水力特性对非饱和边坡稳定性的影响

Influence of Hydraulic Properties on the Stability of Unsaturated Slopes under Transient Seepage Conditions

魏衍杰<sup>1</sup>, 盛园园<sup>2</sup>, 马超<sup>3</sup>

1. 巨野县水务事业发展中心, 山东 巨野 274900;
2. 山东省水文中心, 山东 济南 250002;
3. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:** 土壤水分特征曲线模型对瞬态非饱和渗流条件下的边坡稳定性分析具有重要的理论意义与工程应用价值。通过水力特性试验, 确定了从高塑性黏土到淤泥质砂等不同土壤的土壤水分特征曲线, 得出土壤质地对土壤水分特征曲线模型的性能有较大影响; 通过数值计算得出 VG、K 和 FX 土壤水分特征曲线模型比 BC 和 E 土壤水分特征曲线模型更能代表所研究土壤样本的土壤水分特征曲线, 且土壤水分特征曲线模型的选择对瞬态渗流条件下边坡稳定性分析的可预测性具有重要影响。

**关键词:** 瞬态渗流; 水力特性; 边坡稳定; 土壤水分特征曲线

中图分类号: TD854.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0088-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.016

WEI Yanjie<sup>1</sup>, SHENG Yuanyuan<sup>2</sup>, MA Chao<sup>3</sup>

1. Water Development Center of Juye, Juye 274900, China;
2. Hydrological Center of Shandong Province, Jinan 250002, China;
3. Shuifa Planning & Design Co., Ltd., Jinan 250100, China)

**Abstract:** The soil moisture characteristic curve model has important theoretical significance and engineering application value for slope stability analysis under transient unsaturated seepage conditions. The soil moisture characteristic curves of different soils from high plasticity clay to silty sand are determined by hydraulic property tests, and it is concluded that soil texture has a greater influence on the performance of the soil moisture characteristic curve model; through numerical calculation, it is concluded that the soil moisture characteristic curve models of VG, K and FX are more representative of the soil moisture characteristic curves of the studied soil samples than the soil moisture characteristic curve models of BC and E, and the choice of soil moisture characteristic curve model has a greater influence on the stability analysis of slopes under transient unsaturated seepage conditions. The choice of soil moisture characteristic curve model has an important influence on the predictability of slope stability analysis under transient seepage conditions.

**Keywords:** transient seepage; hydraulic properties; slope stability; soil moisture characteristic curve

## 0 引言

在非饱和条件下, 渗透过程是导致崩塌的主要原因之一<sup>[1-3]</sup>。在渗透过程中, 体积含水量的增加会导致土壤吸力的相应减小, 从而降低非饱和土壤的抗剪强度。非饱和斜坡的稳定状态可通过叠加强度

作者简介: 魏衍杰 (1969—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 水利工程规划设计及建设管理。

通信作者: 马超 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 水利工程规划设计工作。

收稿日期: 2023-08-24

分析的水力解来估算<sup>[4-5]</sup>。土壤水分特性曲线和渗透性值是表征土壤水分特性的两个关键因素，可以通过实验室和现场测试来获得土壤水分特性曲线。在建立土壤水分行为模型时，可使用与实验数据最匹配的土壤水力特性曲线模型来表示土壤的土壤水分特性曲线<sup>[6-7]</sup>。与此相反，直接测量非饱和渗透性不仅成本高昂，而且在实际应用中具有挑战性。因此，土壤水力特性曲线模型对于进行非饱和稳定性分析以及估算水力行为至关重要。

本研究采用实际中常用的 5 种土壤水分特征曲线模型，通过一系列实验室试验，获得从高塑性黏土到淤泥质砂等各种土壤的土壤水分特征曲线，及用于瞬态非饱和渗流条件下的无限边坡稳定性分析方法。利用该分析方法和已确定的土壤-水特性曲线模型，研究选择土壤水分特征曲线模型对稳定性分析可预测性的影响。

## 1 水力特性试验

### 1.1 SWCC 模型

在最常用的土壤水分特征曲线模型中，选择了 5 种土壤水分特征曲线模型进行评估，这些土壤水分特征曲线模型分为以下几类<sup>[8-13]</sup>：单参数土壤水分特征曲线模型 (E)、双参数土壤水分特征曲线模型 (K)、Brooks-Corey 模型 (BC 模型)、Van Genuchten 模型 (VG 模型) 以及 Fredlund 和 Xing 土壤水分特征曲线模型 (FX)。

E、BC 和 VG 土壤水分特征曲线模型是通过经验直接制定的，而 K 和 FX 土壤水分特征曲线模型则是根据孔径分布理论建立的。E 土壤水分特征曲线模型用于大多数渗透问题的分析求解；BC 土壤水分特征曲线模型是一个幂律模型，在空气进入值 (AEV) 处呈现出土壤-水特性曲线的急剧不连续性；VG、FX 和 K 土壤水分特征曲线模型是曲线方程，可连续描述从 AEV 到残余状态的土壤吸力范围内土壤水分特性曲线。

### 1.2 试验材料和方法

测试土壤分为 A、B 两组，A 组土壤由高塑性黏土、黏砂和淤砂组成，A 组土壤分为 S1、S2、S3；而 B 组土壤为淤砂。测试材料的特性见表 1。所有土壤均烘干，并过筛去除大于 2 mm 的土壤颗粒。A 组土壤是按照水冲洗法制备的泥浆状态。每种土壤都与蒸馏水混合，使混合物的含水量高于其液态极限。然后将试样在一个单元中重建，并压缩至每种土壤的空隙率为液限状态下空隙率的 80%。B 组土壤样本通过静态压实法以

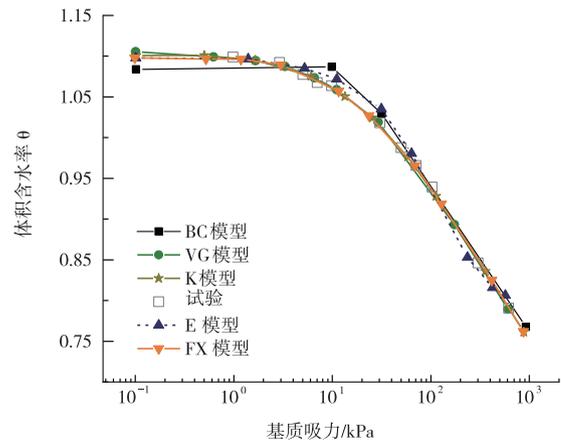
90% 的相对压实度重组，并与含水量为 10% 的蒸馏水混合。将土壤混合物放入湿度可控的干燥器中，至少存放 24 h，以确保水分分布均匀。

表 1 测试土样的基本特性  
Table 1 Basic characteristics of tested soil samples

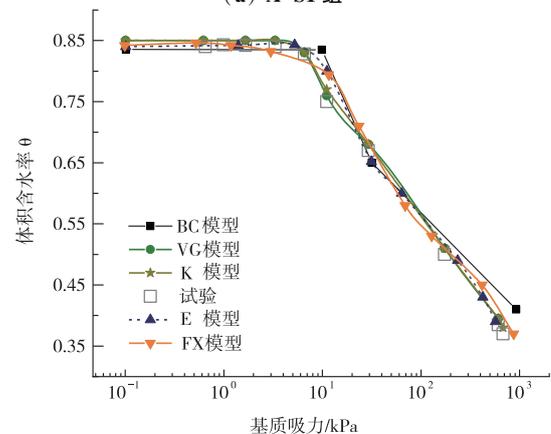
土壤	容重 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	含水率 /%	抗冻等级 F200	比重 $G_s$	塑性 指数 PI	塑限 PL
A 组 S1	15.81	16.91	55.0	2.82	24.3	26.8
A 组 S2	17.66	12.66	30.5	2.61	18.2	21.2
A 组 S3	18.75	10.75	16.3	2.60	4.4	22.8
B 组 —	18.68	9.68	11.9	2.66	—	—

### 1.3 土壤水分特征曲线模型评估

A、B 两组土壤的土壤水分特征曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出，这两个土壤样本的土壤水分特征曲线有明显的差异。这主要是由于试样的初始状态不同，A-S3 组的试样为泥浆试样，B 组的试样为压实试样。因此，可以得出土壤质地对土壤水分特征曲线模型的性能有相当大的影响，尤其是 BC 土壤水分特征曲线模型对粗粒土的适用性。此外，土壤试样的初始状态可以决定土壤水分特征曲线的形状，而不是土壤水分特征曲线模型的性能。



(a) A-S1 组



(b) A-S2 组

岩土力学

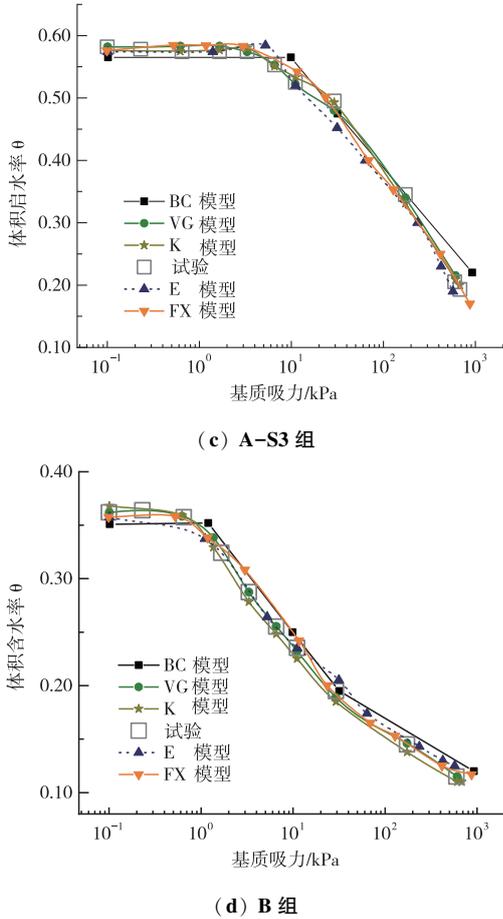


图1 土壤试样的土壤水分特征曲线  
Fig.1 Characteristic soil moisture curves of soil specimen

2 无限边坡稳定性分析

无限斜坡的稳定状态可根据安全系数 (FOS) 曲线进行估算, 当安全系数小于 1 时, 斜坡将被视为沿潜在破坏面破坏。斜坡深度  $z$  处的安全系数 (FOS)。

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma - \mu_a - \mu_s \\ \sigma_s = -\frac{\theta - \theta_R}{\theta_s - \theta_R} s = -S_e s \end{cases} \quad (1)$$

$$FOS(z) = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} + \frac{2c'}{\gamma(H_{wt} - z) \sin 2\beta} - \frac{S_e s}{\gamma(H_{wt} - z)} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \varphi' \quad (2)$$

式中:  $\sigma'$  为有效应力;  $\theta$  为体积含水量;  $s$  为土壤吸力;  $\theta_s$  和  $\theta_R$  分别为饱和状态和残余状态下的体积含水量;  $S_e$  为有效饱和度;  $S_e$  和  $s$  之间的关系可以用土壤水分特征曲线模型来描述, 从而得出以  $S_e$  或  $s$  表示的吸应

力  $\sigma_s$  的闭合形式;  $\varphi'$  为土的有效摩擦角;  $c'$  为有效内聚截距;  $\beta$  为坡度与水平方向的夹角;  $\gamma$  为单位重量;  $H_{wt}$  为地下水位距地表的距离。

理查兹方程<sup>[14]</sup>的混合形式, 以确保非饱和地下水流建模的保守性, 通过求解方程 (3) 可获得瞬态过程中  $S_e$  和  $s$  :

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \nabla \cdot q \\ q = K_z(s) \nabla h \end{cases} \quad (3)$$

数值计算中, 联合初始条件、边界条件及方程 (3), 在给定渗透率的情况下, 边界上的节点可按如下方法处理:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_{in}}{\Delta z} - \frac{(K_z)_{i-1/2} \cdot (h_i - h_{i-1})}{\Delta z} \quad (4)$$

由于  $\theta(t) \leq \theta_s$ , 所以当二者相等时, 径流现象可以确定。

联合式 (1)、(2) 及 (3), 可以评估瞬态过程中基质吸力的变化和非饱和山坡的稳定状态。

3 数值分析

采用本文所开发的土壤水分特征曲线模型, 评估土壤水分特征曲线模型对瞬态渗流条件下稳定性分析结果的影响。选择  $H_{wt} = 5 \text{ m}$ 、 $\beta = 410$  的淤泥质砂质山坡进行几何建模, 如图 2 所示。初始孔隙水压力与地下水位距离成反比, 即  $\psi(z, 0) = -z$ 。

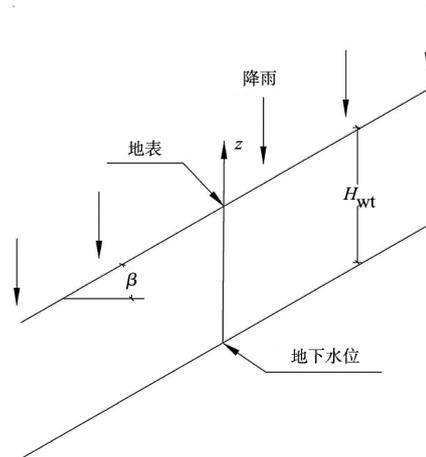


图2 几何模型  
Fig.2 Geometric model

上一节的研究分析表明, A-S3 组土壤所确定的土壤水分特征曲线模型相互之间以及与土壤-水特性曲线都比较吻合, 因此, 选择 A-S3 组土壤水分特征

曲线模型进行数值分析。

在对淤泥质砂土山坡进行无限边坡稳定性分析时，考虑了土壤取样地区的真实降雨记录，其中最大日降雨量为 117.5 mm，最大月降雨量为 405.3 mm。利用所

提出的数值框架，可以得到稳定状态下的基质吸力和 FOS 曲线。图 3 和图 4 分别为最大月降雨量和最大日降雨量对应的基质力和 FOS 曲线。

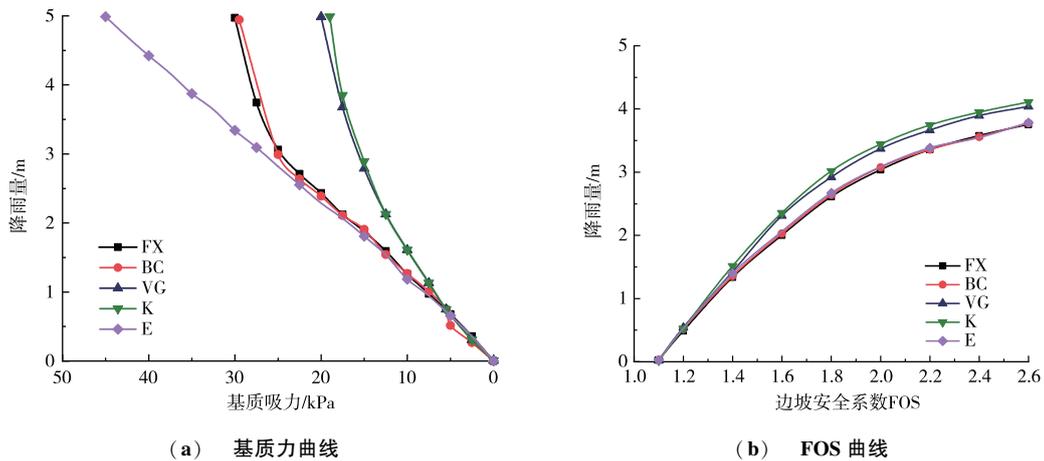


图 3 最大月降雨量对应的基质力和 FOS 曲线  
Fig. 3 Substrate force and FOS curves corresponding to maximum monthly rainfall

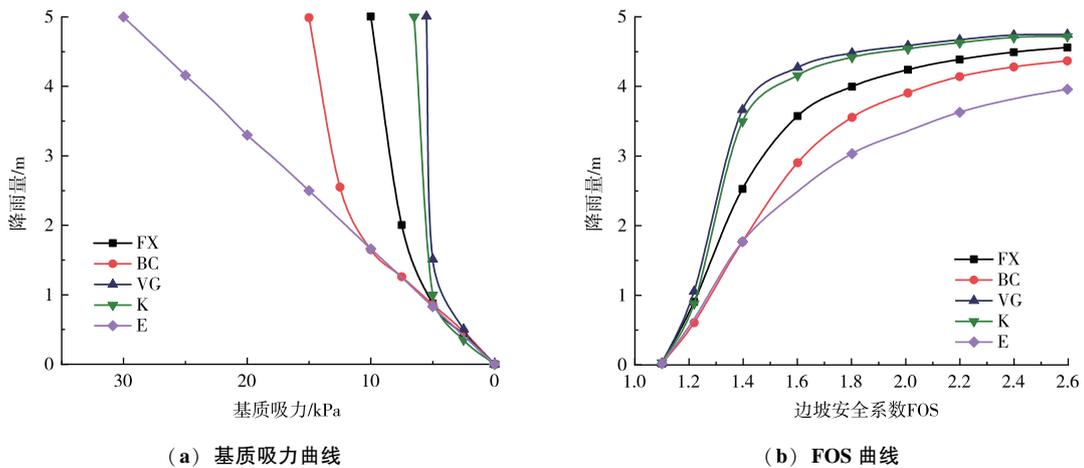


图 4 最大日降雨量对应的基质吸力和 FOS 曲线  
Fig. 4 Substrate suction and FOS curves corresponding to maximum daily rainfall

根据不同土壤水分特征曲线模型进行分析，所预测的基质吸力存在明显差异，尤其是在最大日降雨量情况下。VG 和 K 土壤水分特征曲线模型的分析结果吻合得较好，与初始状态相比，这两种情况下的基质吸力下降最为明显；E 土壤水分特征曲线模型分析显示出最小的基质吸力变化，BC 和 FX 土壤水分特征曲线模型的分析结果也显示出类似的趋势。

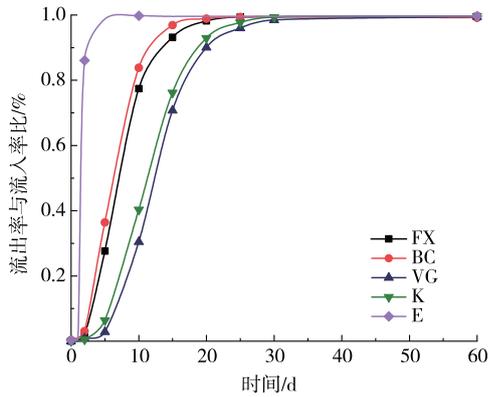
此外，根据流入率和流出率之间的相关性，可以评估采用各土壤水分特征曲线模型的数值框架所模拟的山坡瞬态过程。图 5 为流出率和流入率的比值

随时间的变化。当流出率/流入率  $\approx 1$  时，瞬态过程被看作进入稳态。

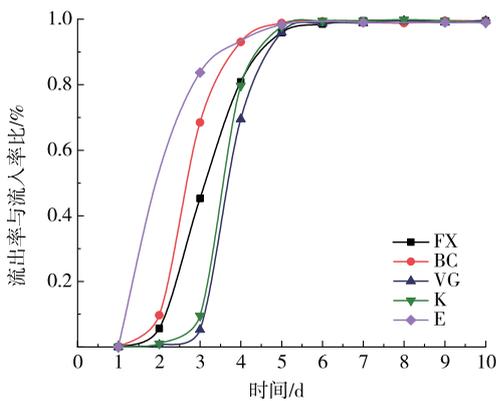
由图 5 可知，在月降雨量最大的情况下，使用 E 土壤水分特征曲线模型分析预测的瞬态过程在 10 d 后迅速地达到稳定状态；使用 VG 土壤水分特征曲线模型分析的瞬态过程达到稳定状态的时间最长，即 50 d 后。降雨强度的增加导致了非饱和土壤的显著水力反应。在最大日降雨量情况下，每种土壤水分特征曲线模型的瞬态过程都同时达到了稳定状态，即在 8 d 后。此外，在两种降雨情况下，采用 E 土壤

岩土力学

水分特征曲线模型分析的出口流量出现最早，其次是采用 BC、FX、K 和 VG 土壤水分特征曲线模型分析的出口流量。



(a) 最大月降雨量条件下



(b) 最大日降雨量条件下

图 5 流出率和流入率比值关系曲线图

Fig. 5 Plot of the relationship between outflow rate and inflow rate ratio

4 结论

(1) 本文选择的 5 个土壤水分特征曲线模型均能有效地描述常见土壤的土壤水分特征曲线。土壤质地对土壤水分特征曲线模型的性能有相当大的影响，尤其是 BC 土壤水分特征曲线模型对粗粒土的适用性。

(2) VG、K 和 FX 土壤水分特征曲线模型比 BC

和 E 土壤水分特征曲线模型更能代表所研究土壤样本的土壤水分特征曲线。

(3) 土壤水分特征曲线模型的选择对瞬态渗流条件下边坡稳定性分析的可预测性具有重要影响。

参 考 文 献

[1] 叶万军, 崔晨阳, 高崇, 等. 水力性质和降雨模式对黄土边坡变形规律的影响 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (4): 60-68, 8.

[2] 闫杰, 李福平, 李伟. 露天矿含断层边坡地下水渗透特性研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31 (2): 92-98.

[3] 王亮, 崔松军, 闻磊, 等. 基于瞬态渗流作用下的堆浸场边坡稳定性分析 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2023, 75 (2): 62-70.

[4] 苏燕, 洪黎丹, 张珑腾, 等. 径向基函数配点法求解边坡降雨瞬态渗流问题 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (1): 94-99.

[5] 何志亮. 滑坡堆积坝三维瞬态渗流及边坡稳定性分析 [J]. 大坝与安全, 2022 (2): 40-44.

[6] 刘建坤, 吴宏伟, 赵洪勇. 应力状态和湿化路径对非饱和边坡的瞬态渗流状况的影响 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2001, 37 (1): 102-108.

[7] 廖炜, 习明星, 崔猛, 等. 降雨入渗对煤系膨胀土边坡瞬态稳定性影响分析 [J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38 (3): 36-40.

[8] 倪沙沙, 张小飞. 库水位升降对那板心墙土石坝渗流场及坝坡稳定性的影响 [J]. 水电能源科学, 2016, 34 (3): 84-87.

[9] 廖军, 龚洪苇, 石磊, 等. 降雨作用下近水平红层公路高边坡渗流场特征研究 [J]. 水力发电, 2020, 46 (10): 47-51, 62.

[10] 鄢永波, 甘海阔. 降雨条件下超高单台阶排土边坡稳定性分析 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2020, 72 (1): 20-25.

[11] 吴辉, 尚羽. 基于水土相互作用的边坡稳定性分析 [J]. 中外公路, 2011, 31 (3): 26-30.

[12] 王立, 夏力农, 胡海涛. 非饱和均质砂土边坡降雨入渗和稳定性分析 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2014, 24 (4): 52-56.

[13] 杨大海, 王建国. 排水法治理膨胀土滑坡研究 [J]. 工程与建设, 2007, 21 (4): 607-609.

[14] RICHARDS LA. Capillary conduction of liquids through porous mediums, 1931, 4 (1) 318-333.