

半无限封闭含水层非稳定渗流的 “浸润锋面”最大距离研究

刘茂, 郭华, 王双峰, 张鹏

(四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610072)

摘要: 目前, 鉴于上为半透水层下为透水含水层的半无限封闭结构岸坡的非稳定渗流研究较少, 前人对半无限封闭含水层非稳定渗流的“浸润锋面”的研究鲜见报道。采用二维渗流理论和相关的有限元理论, 利用 Autobank 有限元程序, 在未考虑复杂的水位变化过程的情况下, 对半无限封闭含水层非稳定渗流的“浸润锋面最大距离”的影响因素进行了一系列的研究, 得到了各个影响因素对浸润锋面最大距离的渗流规律; 通过正交实验设计, 利用极差分析得到各个影响因素对浸润锋面最大距离影响的大小顺序, 影响因素由大到小顺序为: 水头高度 > 透水层渗透系数 > 透水层厚度 > 渗流时间 > 坡率 > 初始水位, 为具有该结构岸坡的渗流规律提供一定参考意义, 为控制岸坡渗流提供一定依据。

关键词: 半封闭含水层; 二维非稳定渗流; 浸润锋面最大距离

中图分类号: TU441+.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)06-0228-07

Seepage Front Maximum Distance of Unsteady Seepage in Semi-infinite Confined Aquifer

LIU Mao, GUO Hua, WANG Shuangfeng, ZHANG Peng

(Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: At present, there are few studies on unsteady seepage and seepage front of unsteady seepage in semi-infinite confined aquifer. Based on two-dimensional seepage theory and related finite element theory, without considering the complex process of water level change, a series of experiments were tested considering the influencing factors of the seepage front maximum distance in semi-infinite confined aquifer by using Autobank finite element program, and the law of the maximum distance of the seepage front surface was obtained by the influencing factors. The order of each influence factor on the maximum distance of the seepage front surface was obtained by the orthogonal experiment. The effects range from large to small in descending order: head height, permeability coefficient of aquifer, thickness of aquifer, seepage time, slope rate, initial head boundaries. This paper could provide certain reference for the seepage law of the bank slope of the structure, and lay the foundation for the seepage control.

Keywords: semi-confined aquifer; two-dimensional unsteady seepage; maximum distance of seepage front

半无限单一均质土层的渗流问题研究的较多, 现阶段理论也较成熟, 但是对于半无限封闭含水层的渗流问题相对研究的较少, 且大部分都是研究坝体的渗流问题。毛昶熙等^[1]基于堤身浸润线呈斜直线向前推进的假定, 推导了不透水地基和透水地基(双层和多层)上的堤防非稳定渗流浸润距离 L

的简化计算公式, 但此公式中采用的补给系数受多种影响因素的影响; 吴世余^[2]推导了双层地基(下为砂层、上为黏性土的覆盖层)的非稳定渗流方程及在特殊条件下的解析解; 我国《堤防工程设计规范》^[3](GB 50286—2013)假设浸润线锋面近似呈直线状, 推导了不透水层地基浸润线锋面 t 时刻的最

大距离公式;针对透水地基的浸润线锋面研究较少,且理论也不成熟,谢斯塔克夫假定上游斜体的渗流全部垂直下渗进入到地基(透水层)而给出了渗流量的计算式,但与实际情况误差较大^[4],王伟等^[5]假定上游斜体有部分渗流进入地基(透水层)给出渗流量的计算式,前人研究都是围绕着渗流量进行研究,缺乏对坝体浸润线锋面的相关研究,对透水层地基的浸润线锋面的研究鲜见报道。

前人关于透水地基坝体的相关渗流研究的较多,且大多为稳定渗流问题,还有主要是针对渗流量进行研究,浸润锋面研究的更少,且没有很好的简易公式,本文借鉴透水地基均质坝体结构思想,参考岸坡的双元结构,提出了“半无限封闭含水层结构”的概念,即:上为半透水层(黏性土)下为透水含水层(粉砂层)的地质结构被河流切割而形成。随着计算机的发展,数值法在地下水分析中被广泛使用,本文采用数值法进行非稳定渗流的研究,数值法主要包括有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法和流形元法等^[6-7]。本文利用 Autbank 有限元程序,采用二维渗流理论和相关的有限元理论,借鉴坝体渗流研究中的“浸润锋面”概念,针对半无限封闭含水层非稳定渗流的浸润锋面最大距离的影响因素进行了一系列的研究,为具有该结构岸坡的渗流规律提供一定的参考意义,为控制岸坡渗流提供一定依据。

1 理 论

1.1 渗流理论

二维渗流的一般控制微分方程为^[8]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H_{\text{总}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H_{\text{总}}}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

式中: $H_{\text{总}}$ 为总水头; K_x 为 x 方向的渗透系数; K_y 为 y 方向的渗透系数; Q 为施加的边界流量; θ 为单位体积含水率; t 为时间。

对于有自由面的非稳定渗流,可采用平均渗流

水深 H 的方式,即:由于微元流量流入流出差额使自由水面升降的水的体积平均分配于高度 H 上,得到以给水度表达的二维渗流控制微分方程,即为 Boussinesq 方程^[9-10],具体方程如下:

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y H \frac{\partial H}{\partial y} \right) + w \quad (2)$$

式中: μ 为给水度,或含水层的自由孔隙率; H 为某点处含水层的厚度, m ; k 为渗透系数, m/d ; w 为入渗补给强度, m/d ; $\frac{\partial H}{\partial t}$ 为潜水面变化速率。

给水度除与渗透系数密切相关外,还与土的紧密度和介质的几何性质有关^[4,11],本文给水度计算采用南京水利科研院的给水度公式,公式为:

$$\mu = 1.137n(0.0001175)^{0.067(6+\lg k)} \quad (3)$$

式中: μ 为给水度,或含水层的自由孔隙率; k 为渗透系数, m/d ; n 为体积孔隙率。

1.2 有限元理论

对控制方程应用加权余量的伽辽金方法,可以得到二维渗流的有限元方程^[8,12]:

$$\tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA [H] + \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA [H] | t = q \tau \int_A \langle N \rangle dL \quad (4)$$

式中: $[B]$ 为梯度矩阵; $[C]$ 为单元渗透系数矩阵; $[H]$ 为节点水头矩阵; $\langle N \rangle$ 为插值函数向量; q 为穿过单元边界的单元流量; τ 为单元厚度; t 为时间; λ 为存储项,对瞬态顺流等于 $m_w \gamma_w$; A 为在单元面积上的求和符号; L 为在单元边界长度上的求和符号。

2 模型建立

假设条件:①各含水层均质、各向同性、土层水平且侧向无限延伸;②渗流为二维流且服从达西定律;③河水位上升为瞬时完成,不考虑入渗补给;④初始潜水位与河道的初水位(h_0)水平^[13];⑤渗流模型底部透水性可忽略不计(或者采取很小的值)。

依据以上假设条件,具体模型如图 1 所示。

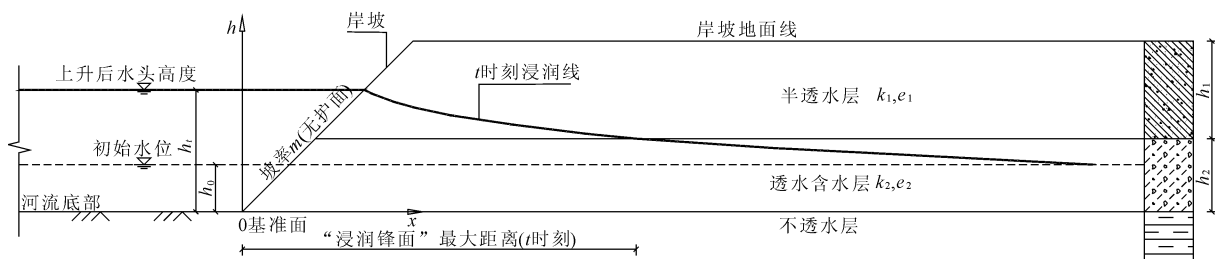


图 1 河道切割形成的半无限密闭含水层结构

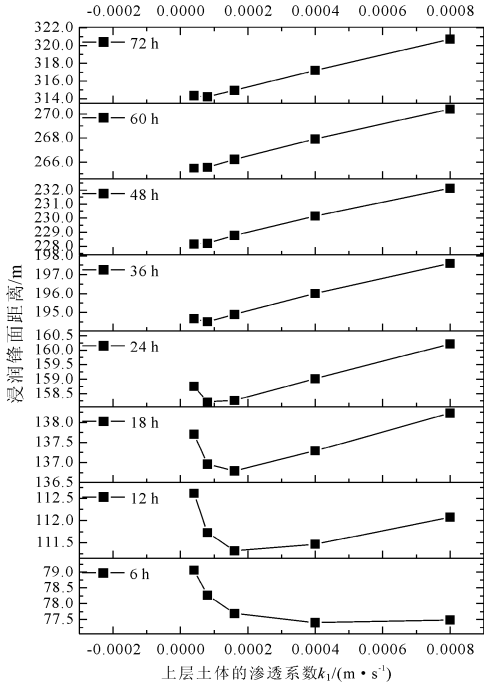
鉴于三角形单元能较好地适应渗流场复杂的边界形状和非均质土层分布,因此,单元采用常用的三角形单元,本文模型划分的网格密度为 3.03,基本上能满足模型的精度要求。

3 浸润锋面最大距离影响因素分析

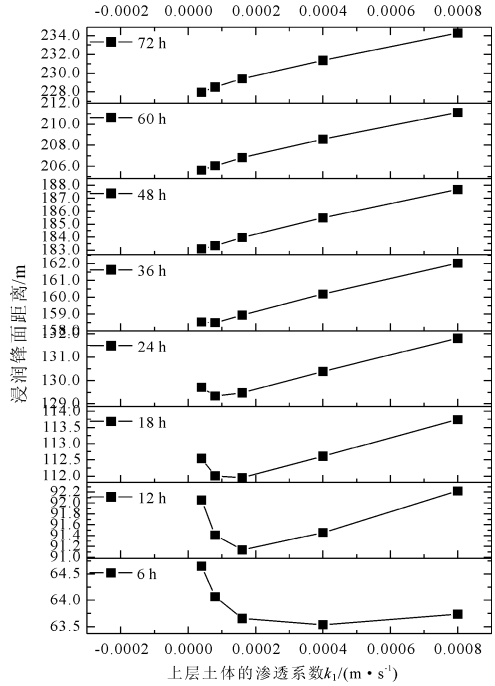
3.1 渗透系数的影响

本渗流模型采用直立岸坡,含水层渗透系数 k_2

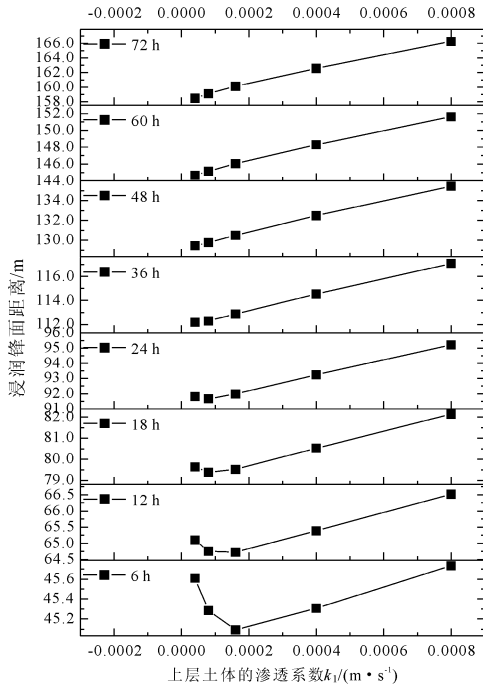
分别取 0.002 m/s,0.004 m/s 和 0.006 m/s,孔隙率 $e_2 = 0.335$,相对弱透水层渗透系数 k_1 分别为 0.000 04 m/s、0.000 08 m/s、0.000 16 m/s、0.000 40 m/s、0.000 80 m/s,孔隙率 $e_1 = 0.395$,初始水位为 12 m,瞬时上升的水头为 28 m,计算的非稳定渗流浸润锋面距离见图 2 和图 3。



(a) 含水层渗透系数 $k_2=0.006$ m/s



(b) 含水层渗透系数 $k_2=0.004$ m/s



(c) 含水层渗透系数 $k_2=0.002$ m/s

图 2 不同持续时间的浸润锋面最大距离与渗透系数 k_1 关系曲线

由图 2 可知,短时间渗透,随着上部半透水层的渗透系数增大呈凹曲线型式,上部半透水层渗透系数越小下降越快,随着渗透系数增大,浸润锋面最大距离呈近直线增长,且斜率越来越大;较长时间渗透,随着上部半透水层的渗透系数增大基本上呈线性增长趋势(渗透系数极小的除外);随着下部透水层渗透系数的增大,凹曲线下部部分的历时越来越短。

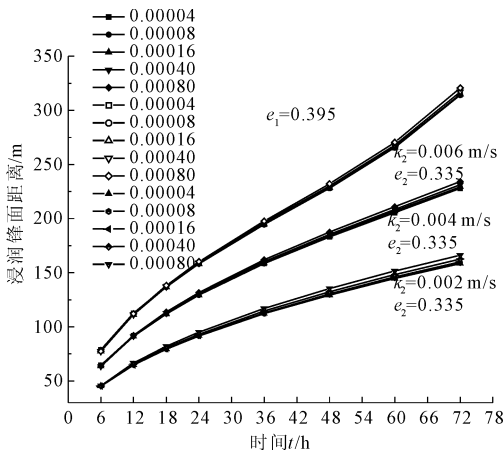


图 3 不同渗透系数的浸润锋面最大距离随渗流时间关系曲线

由图 3 可知,浸润锋面最大距离受下部透水层的渗透系数控制,受上部半透水层的渗透系数影响很小。短时间渗透,浸润锋面最大距离随下部透水层渗透系数增大呈减速增长趋势,长时间渗透,浸润锋面最大距离随下部透水层渗透系数增大呈指数趋势增长,短时间和长时间渗透的界定时间为 60 h。

3.2 透水含水层厚度的影响

本渗流模型采用直立岸坡,透水含水层渗透系数 $k_2 = 0.004 \text{ m/s}$,孔隙率 $e_2 = 0.335$,相对弱透水层渗透系数 $k_1 = 0.00004 \text{ m/s}$,孔隙率 $e_1 = 0.395$,初始水位为 12 m,瞬时上升的水头为 28 m,含水层厚度取 0.5 m ~ 20.0 m,计算的非稳定渗流浸润锋面距离见图 4、图 5 和图 6。

由图 4 可知,浸润锋面最大距离随透水含水层厚度增厚呈现先增大再减小最后趋于线性增长的趋势。

初始水位低于下部透水层底面时,下部透水层厚度小于等于初始水位与透水层顶的距离的一半时,浸润锋面最大距离随土层厚度呈上凸幂函数增长。下部透水层厚度大于初始水位与透水层顶距离一半的 $1/2 \sim 3/4$ 时,渗流时间小于 24 h 时,随着下部透水层厚度增大,浸润锋面最大距离减小,渗流时

间大于 24 h 时,随着下部透水层厚度增大,浸润锋面最大距离呈现先减小再增大趋势,下部透水层厚度为初始水位与透水层顶距离一半的 $3/4 \sim 1$ 时,浸润锋面最大距离呈近直线下降,且下降的速率随着渗流时间增长而增大。

初始水位高于下部透水层底面时,随着下部透水层厚度的增大,浸润锋面最大距离呈近线性增长,且随着渗透时间推移,增长速率增大。

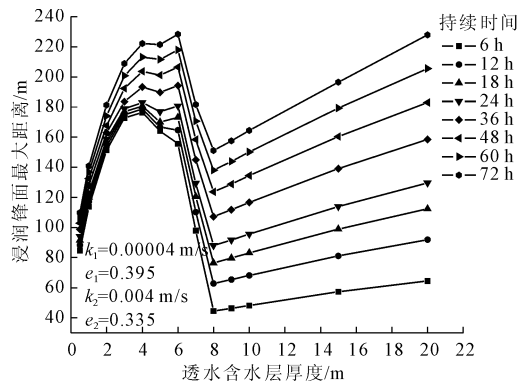


图 4 不同持续时间的浸润锋面最大距离与含水层厚度关系曲线

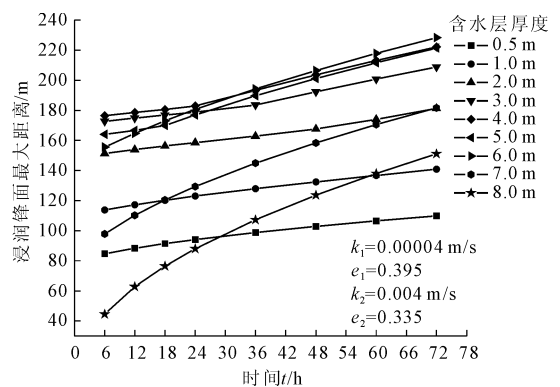


图 5 不同含水层厚度的浸润锋面最大距离与渗流时间关系曲线(初始水位低于下部透水层底面)

由图 5 可知,初始水位低于下部透水层底面时,渗流时间小于 24 h 时,浸润锋面最大距离为下部透水层厚度等于初始水位与透水层顶的距离的一半;渗流时间大于 24 h 时,浸润锋面最大距离为下部透水层厚度等于初始水位与透水层顶的距离的 $3/4$ 处。

下部透水层厚度小于等于初始水位与透水层顶的距离的一半时,浸润锋面最大距离随土层厚度增大呈近线性增长;下部透水层厚度大于初始水位与透水层顶的距离的一半时,浸润锋面最大距离随土层厚度增大呈上凸幂函数趋势增长。

由图 6 可知,初始水位高于下部透水层底面时,

随着渗透时间的推移,浸润锋面最大距离呈上凸幂函数趋势增长,下部透水层厚度越厚,浸润锋面最大距离增长速率增大。

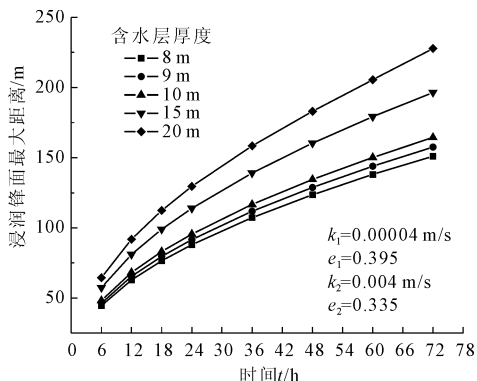


图 6 不同含水层厚度的浸润锋面最大距离与渗流时间关系曲线(初始水位高于下部透水层底面)

3.3 初始水位在透水层位置的影响

本模型采用直立岸坡,透水含水层厚度为 20 m,含水层渗透系数 $k_2 = 0.004$ m/s,孔隙率 $e_2 = 0.335$,相对弱透水层渗透系数 $k_1 = 0.00004$ m/s,孔隙率 $e_1 = 0.395$ 。初始水位分别取 12 m、13 m、14 m、15 m、16 m、17 m、18 m,瞬时上升的水头高度为 28 m,计算的非稳定渗流浸润锋面距离见图 7 和图 8。

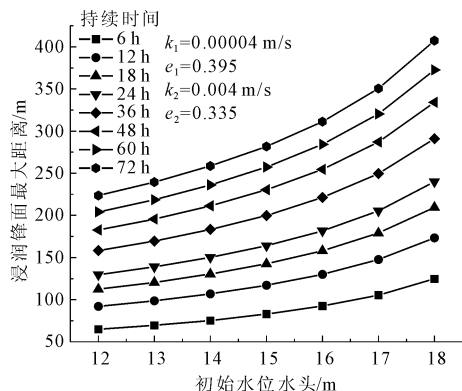


图 7 不同持续时间的浸润锋面最大距离与初始水位关系曲线

由图 7 可知,浸润锋面最大距离随位于透水含水层的初始水位增高呈指数增长趋势,且渗流时间越长,浸润锋面最大距离增长越快。

由图 8 可知,浸润锋面最大距离随渗流时间呈上凸幂曲线增长,且随着水头的增高,浸润锋面最大距离增长越快。

3.4 斜坡坡率的影响

本模型采用倾斜岸坡,透水含水层渗透系数 $k_2 = 0.004$ m/s,孔隙率 $e_2 = 0.335$,相对弱透水层渗

透系数 $k_1 = 0.00004$ m/s,孔隙率 $e_1 = 0.395$,初始水位分别取 12 m,瞬时上升的水头高度为 28 m,倾斜岸坡坡率分别为 0.00、0.25、0.50、0.75、1.00,计算的非稳定渗流浸润锋面距离见图 9 和图 10。

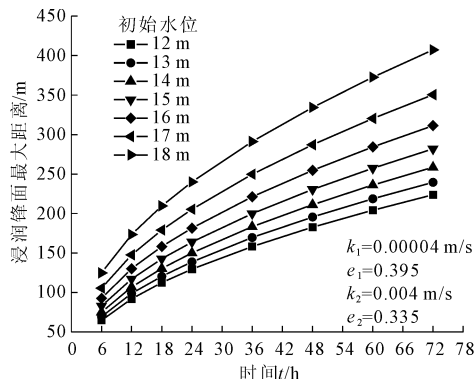


图 8 不同初始水位的浸润锋面最大距离与渗流时间关系曲线

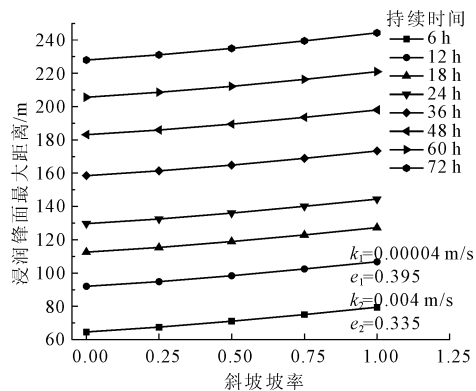


图 9 不同持续时间的浸润锋面最大距离与岸坡坡率关系曲线

由图 9 可知,浸润锋面最大距离受斜坡坡率影响较大,随着岸坡斜率的增大呈近线性增长,且增长的斜率基本不随渗透时间变化。

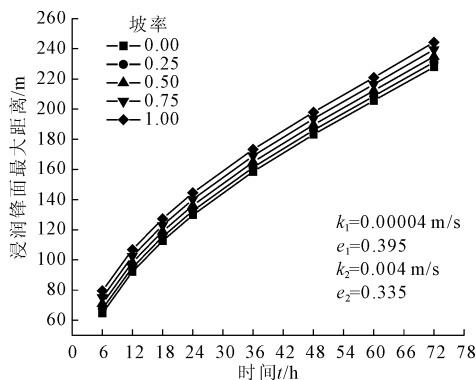


图 10 不同岸坡坡率的浸润锋面最大距离与渗流时间关系曲线

由图 10 可知,浸润锋面最大距离随着渗流时间

增长,基本呈上凸幂函数曲线增长,曲线形状基本不受斜坡坡率影响,但随着斜率增大而增大,增大的幅度基本一致。

3.5 水头高度的影响

本模型采用直立岸坡,透水含水层渗透系数 $k_2=0.004\text{m/s}$,孔隙率 $e_2=0.335$,相对弱透水层渗透系数 $k_1=0.00004\text{m/s}$,孔隙率 $e_1=0.395$,初始水位分别取 12 m、21 m、22 m、23 m、24 m、25 m、26 m、27 m、28 m,计算的非稳定渗流浸润锋面距离见图 11 和图 12。

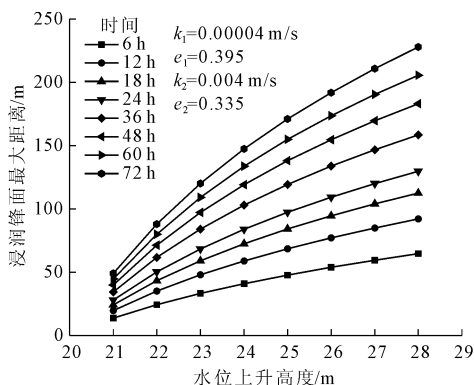


图 11 不同持续时间浸润锋面最大距离与水头关系曲线

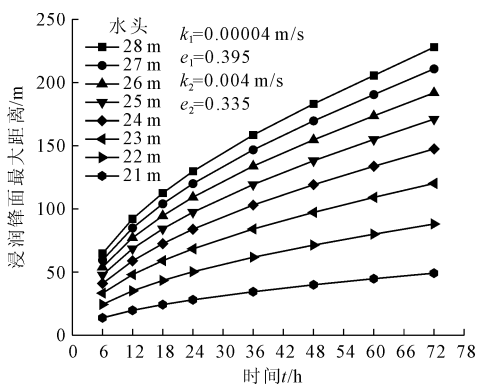


图 12 不同水头浸润锋面最大距离与渗流时间关系曲线

由图 11 和图 12 可知,浸润锋面最大距离随着水头高度的增大呈上凸幂函数增长,同一水头随着渗透时间的增长,浸润锋面最大距离增长越慢。

4 影响浸润锋面最大距离的因素分析

由以上影响因素分析可知,浸润锋面最大距离的影响因素本次考虑如下六个因素:透水层渗透系数、初始水位、透水层厚度、水头高度、坡率、渗流时间,每个影响因素都考虑 5 个水平,通过等水平正交试验设计^[14-15],采用 $L_{25}(5^6)$ 等水平正交表进行试验设计,利用极差分析法可以直观简便地分析实验结果,确定因素的主次,极差越大,该因素对实验结

果的影响越大,正交试验设计的因素及水平见表 1。

表 1 正交试验设计的因素及水平

水平	透水层渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	初始水位 /m	透水层厚度 /m	水头高度 /m	坡率	时间 /d
1	0.015	1	1	2	0.0	1
2	0.212	3	5	4	0.5	2
3	0.409	5	9	6	1.0	3
4	0.606	7	13	8	1.5	4
5	0.803	9	17	10	2.0	5

依据正交设计和极差分析可知:各个因素对浸润锋面最大距离影响大小顺序如下:水头高度 > 透水层渗透系数 > 透水层厚度 > 渗流时间 > 坡率 > 初始水位。

5 结论

(1) 浸润锋面最大距离的影响因素主要有透水层渗透系数、初始水位、透水层厚度、水头高度、坡率、渗流时间六个影响因素。

(2) 浸润锋面最大距离受下部透水层的渗透系数控制,受上部半透水层的渗透系数影响很小;随土层厚度增厚呈现先增大再减小最后趋于线性增长的趋势;初始水位位于下部透水层范围内时,浸润锋面最大距离随初始水位增高呈指数增长趋势,且渗流时间越长,浸润锋面最大距离增长越慢;随着岸坡斜率的增大呈近线性增长,且增长的斜率基本不随渗透时间变化;随着水头高度的增大呈幂函数增长,且随着渗透时间的增长幂因素越来越大。

(3) 在未考虑复杂的水位变化过程的情况下,各个影响因素对浸润锋面最大距离影响大小顺序河渠边界如下:水头高度 > 透水层渗透系数 > 透水层厚度 > 渗流时间 > 坡率 > 初始水位。

参考文献:

- [1] 毛昶熙,冯玉宝,段祥宝. 堤防设计中的非稳定渗流计算[J]. 水利学报,2002(12):56-62,67.
- [2] 吴世余. 双层地基的非稳定渗流[J]. 水利学报,2002(8):82-86.
- [3] 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013:82-83.
- [4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2003:97,353.
- [5] 王韦,陈平. 透水地基上均质土坝的渗流计算[J]. 水利学报,1964(1):57-61.
- [6] 许建建,惠焕利,裴旭阳. 基于三维渗流数值模拟的调蓄水池地下水渗流影响分析[J]. 水利与建筑工程学

- 报,2020,18(2):256-262.
- [7] 唐红梅,陈洪凯,关明芳. 边坡渗流研究现状及趋势分析[J]. 重庆交通学院学报,2006,25(1):78-83.
- [8] GEO-SLOPE International Ltd. 著. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 中仿科技(Cn Tech)公司译,北京:冶金工业出版社,2011:141-143.
- [9] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析法[M]. 北京:科学出版社,1990:9-12.
- [10] 陈崇希,林敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999:30-33.
- [11] 薛定谔 A E 著. 多孔介质中的渗流物理[M]. 王鸿勋,张朝琛,孙书琛,译. 北京:石油工业出版社,1982:156.
- [12] Phanuwat Suriyachat, Pachero Yungyune. Normalized graphs for seepage analyses along sheet pile in double soil layers[J]. Thammasat Int. J. Sc. Tech., 2003,8(1):13-21.
- [13] 吴丹,陶月赞,林飞. 复杂函数边界控制下的潜水非稳定流模型及解的应用[M]. 水利学报,2018,49(6):725-731.
- [14] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2003:10-25.
- [15] 尹志刚,范巍,董思健,等. 基于正交试验设计的再生骨料透水混凝土力学性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):21-25.

(上接第 207 页)

- [11] 李业,林锋,王川,等. 如美水电站花岗岩卸荷力学特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):109-114.
- [12] 胡斌,姚文敏,余海兵,等. 分步开挖卸荷作用下软硬互层边坡的稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(29):281-286.
- [13] 闵勇章,凡亚,刘永波. 近坝库岸卸荷松动岩体稳定性分析及入库涌浪计算[J]. 水电站设计,2019,35(3):1-4,20.
- [14] 丁秀丽,付敬,刘建,等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005(19):12-20.
- [15] 岳建军. 缓倾外软硬互层型滑坡基本特征及失稳机理研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
- [16] 陈红军,刘新荣,王成,等. 倾斜软硬互层隧道破坏过程的围岩应力研究[J]. 现代隧道技术,2017,54(4):68-76.
- [17] 蒋金阳. 软硬互层边坡倾倒变形破坏特征及支护效果的大型离心机试验研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [18] 任松,欧阳汛,姜德义,等. 软硬互层隧道稳定性分析及初期支护优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(7):17-22.
- [19] 裴峰,张军工,马庆福,等. 卸荷条件下岩石破坏能量演化试验研究进展[J]. 金属矿山,2017(5):1-6.
- [20] 谢勇谋. 深埋长大隧道软硬互层型围岩分级探讨[J]. 建筑技术开发,2019,46(15):160-162.
- [21] 文联勇. 高陡变质层状斜坡结构特征对斜坡变形、稳定性的影响研究——以雅砻江卡拉水电站顺层斜(边)坡为例[D]. 成都:成都理工大学,2013.