

堤岸退水速度判别指标的试验研究

余湘娟¹, 王路军¹, 张幸农², 应强²

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过高水位长时间持续作用下不同退水速度的大型室内模型试验, 观测不同退水过程的坡体内固定测点的水头变化过程, 研究了坡体内孔压消散过程。研究表明, 坡体内孔压消散指标和降速评价指标呈对数逻辑增长型函数关系, 并得到了背水侧有补给源条件下均质土堤的退水速度判别指标界限值, 同时, 根据逻辑增长型函数特点得到一种求解退水速度判别指标界限值的简化方法。借助于非稳定渗流有限元分析, 研究了多种因素对退水速度判别指标界限值的影响。研究表明, 退水速度判别指标界限值的对数值与水位降幅和补给源水位之间呈现很好的平行线性关系, 并且可以通过正交试验分析得到三者之间的经验关系式。

关键词: 模型试验; 堤岸; 退水速度; 判别指标; 非稳定渗流

中图分类号: TV139.16 **文献标识码:** A

水位降落对堤岸边坡稳定性的影响是岩土工程界中一个十分重要且棘手的问题。在高水位时, 堤岸岩土体因浸泡饱和而抗剪强度降低, 当水位骤降时, 不仅土体容重发生变化, 而且会产生对坡体稳定不利的非稳定渗流, 致使土粒间有效应力减小, 危及边坡的稳定。我国堤防工程设计规范^[1]规定, 在抗滑稳定计算时考虑设计洪水位骤降期的临水侧堤岸的稳定性。但实际上各条河流退水速度存在差异, 有的相去甚远, 河道在典型设计洪峰作用下并不一定会达到骤降状态。因此, 需要研究堤岸退水速度判别指标界限值并借以评判设计洪水位降落期的临水侧堤岸内浸润线下降情况, 这对堤防稳定性分析及设计方案的合理性、经济性来说显得非常有意义。

鉴于此, 本文在背水侧有补给源的前提下, 模拟了在高水位长时间持续条件下不同退速的退水情况, 并通过饱和、非饱和渗流的有限元计算, 研究了坡体内孔压消散过程, 提出了背水侧有补给源条件下均质土堤的水位降速评价指标界限值, 并分析了密实度、水位降幅及补给源水位对评价界限值的影响。

1 室内退水模型试验

试验坡体修筑在宽水槽中, 水槽底部为混凝土地基。试验坡体坡比为 1:1.5, 宽 7.1m, 高 1.6m(横断面见图 1)。参考长江堤岸崩岸段下部细砂的组成, 试验选用级配居中的长江砂作为试验用土, 试验土料的相对密实度为 0.68, 土的基本性质见表 1。试验通过水槽蓄、放水形成洪水位升降条件。如图 1 所示, 为模拟坡体背水侧有补给源的情况, 在坡体后方设置反渗井并维持其水位不变, 将水槽和反渗井中水位调节至 1.41m, 让坡体充分浸泡, 以模拟高水位洪水的长时间持续, 之后, 开启尾阀放水并实时调节开启阀度, 尽量达到线性退水条件, 让水位退至尾堰高度(0.20m)。试验实测退水时程线如图 2, 工况 1 到工况 8 的平

收稿日期: 2004-11-11

作者简介: 余湘娟(1957-), 女, 浙江台州人, 教授, 主要从事岩土工程的教学及科研。E-mail: xjyu@hhu.edu.cn

均退水速度依次为 4.44m/h、1.61m/h、0.89m/h、0.62m/h、0.36m/h、0.27m/h、0.20m/h、0.10m/h，线性相关系数均大于 0.987，可以认为达到线性退水条件。由于对自由面进行实时量测存在困难，所以试验利用预先设置的两组测压管来测定底部测点的水头值，借助非稳定渗流分析计算得出其实时自由面的位置(测点布置见图 1)。

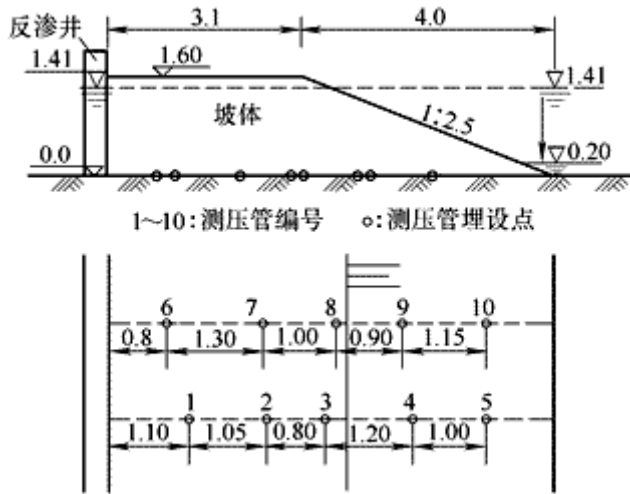


图 1 模型坡体断面及测点布置(单位:m)

表 1 试验土的基本性质

饱和密度 $\rho_{sat}/(g/cm^3)$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	湿密度 $\rho/(g/cm^3)$	对密实度 D_r	孔隙率 n	饱和渗透系数 $K/(m/s)$
1.93	1.50	1.68	0.68	0.43	1.0E-4

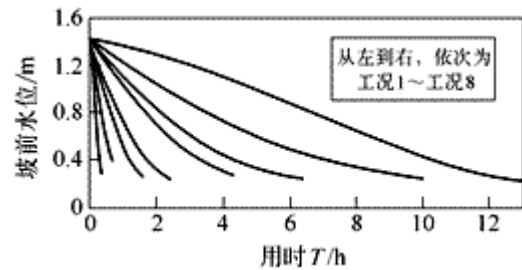


图 2 试验退水时程线

2 非稳定渗流分析

2.1 基本方程式 常用的饱和与非饱和耦合计算数学模型是在假定土中饱和、非饱和状态水分运动基本方程式符合达西定理和连续性方程的前提下推导出来的。二维饱和、非饱和渗流支配方程式^[2~4]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] = [C(h) + \lambda S_s] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为总水头; h 为压力水头; $H=h/(\rho_w g)+z$; θ 为体积含水率; $C(h)=\partial\theta/\partial h$ 为容水度, 在饱和区 $C(h)=0$; λ 是判断饱和与非饱和状态的参数, $\lambda=0$ 时计算非饱和渗流, $\lambda=1$ 时计算饱和渗流; S_s 是贮水率。

初始条件: $H(x, z, 0)=H_0(x, z)$ 。

边界条件: 已知水头边界 Γ_1 上为 $H(x, z, t)=H_0(x, z, t)$; 在饱和逸出段边界 Γ_2 上为 $H(x, z, t)=z$;

已知流量边界 Γ_3 上为 $K_s(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n_0, x) + K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n_0, z) = q$ 。

其中, q 为边界流量; x, z 为笛卡尔坐标系中的水平坐标与铅直坐标; n_0 是边界的外法线方向, (n_0, x) 和 (n_0, z) 是外法线方向 n_0 和 x, z 轴的夹角。

使用式(1)可对饱和、非饱和渗流同时进行解析,但是要取得正确的计算结果,必须采用符合实际的边界条件及符合土质的非饱和渗透特性曲线。

2.2 土的非饱和渗透特性 水分特征曲线可以通过实测得到^[2, 5],但通常用实测结果拟合出经验关系或通过指定某种数学模型用少量的试验数据确定参数后推求, Van Genuchten^[6]将水分特征曲线的关系使用一个数值模型(VG模型)来表示。

非饱和透水系数 $K(\theta)$ 的测定方法比较复杂,一般根据水分特征曲线估算。Muallem^[7]于1978年提出了水分特征曲线和非饱和透水系数的数值简化模型。结合VG模型便可以根据实测水分特征曲线来求土的非饱和渗透特性(见图3),左边曲线为实测水分特征曲线,右边为推求的相对渗透系数 K_r 与体积含水率 θ 关系曲线(试验坡体饱和渗透系数 $K_0=1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$)。

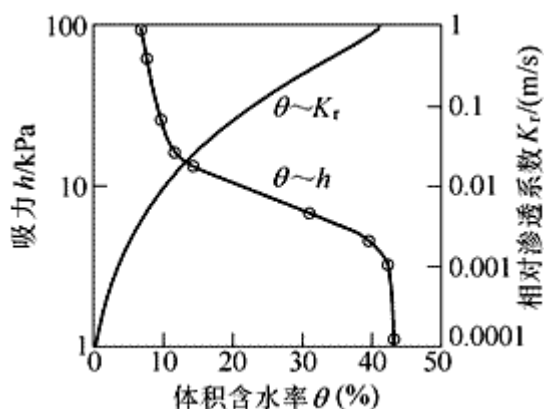


图3 非饱和土渗透特性曲线

2.3 有限元计算 非饱和土的渗透特性见图3,并且认为试验土体透水性为各向同性,同时不考虑水体和土骨架的压缩性,故 S_s 为零。因混凝土地基的渗透系数远远低于坡体的,故忽略其对坡体渗流的影响以简化计算。计算采用如图4所示的坡体有限元网格剖分,临水侧坡体网格局部加密。

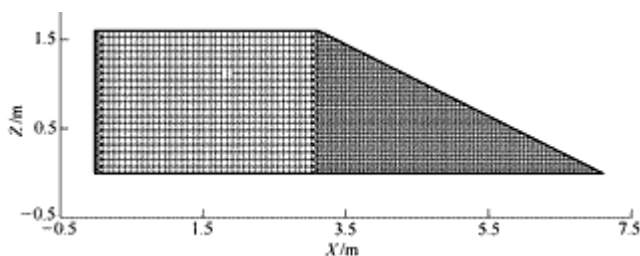


图4 坡体有限元网格剖分

3 坡体内的非稳定渗流

3.1 非稳定渗流计算结果验证 依据实测得到测压管水头值可以对计算结果的可信性进行验证。表2为各个工况下相对误差的最大值,除工况1的相对误差稍微大一点以外,其它工况的相对误差最大值均在5%以内。

表2 各工况测点水头相对误差最大值

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
相对误差最大值(%)	7.67	3.85	1.84	1.58	1.03	1.35	1.18	1.08

图5为工况3下1号到5号测压管计算和实测水头值变化过程线。从图5可以看出,根据有限元计算得到的结果与实测结果十分接近。由此可见,只要正确地把握土的非饱和渗透特性和初始状态,利用有限

元法也可以得到比较符合实际情况的饱和-非饱和渗流计算结果，并据此可以计算研究实测中未能明确的渗流问题。

3.2 孔压消散过程 如图 5 所示，虚竖线对应的时刻为退至终降水位时刻，此前为线性退水时段。在退至终降水位后，坡体内孔压还在持续缓慢地下降，尚未达到渗透稳定。如图 5 所示 1 号到 5 号测压管水头过程线，同一时刻不同位置的水头下降幅度是不同的，越接近坡脚水头下降幅度越大，所以用某一位置的水头下降幅度与最终下降幅度的比值作为反映孔压消散程度的指标不具有唯一性，应该采用坡体内水头即时消退面积与最终消退面积比值 E 作为孔压的消散程度指标，该指标值可以综合反映坡体内孔压消散情况。不同退速退至终降水位时坡内水头的即时消退面积各不相同， E 值与退速之间具有一一对应关系。另外可以看出，线性退水条件下的孔压消散速度是非线性的，并且可以分为三个阶段，第一阶段，孔压随水位的下降快速消散，消散速度很快；第二阶段为弧形过渡段；在第三阶段，消散速度快速减缓，并趋向于稳定。

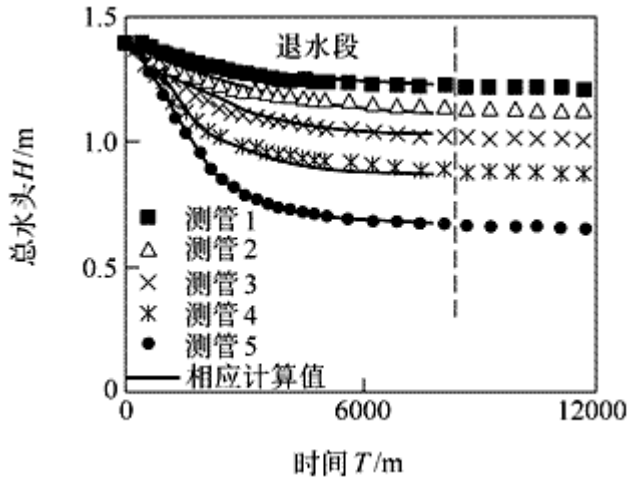


图 5 计算和实测水头值变化过程线

条件下的孔压消散速度是非线性的，并且可以分为三个阶段，第一阶段，孔压随水位的下降快速消散，消散速度很快；第二阶段为弧形过渡段；在第三阶段，消散速度快速减缓，并趋向于稳定。

4 降速评价指标界限值

一方面，由前面分析知道，在水位线性退至终降水位时，取坡体内水头即时消退面积与最终消退面积比值 E 作为孔压消散指标，可以真实地反映孔压消散情况。另一方面，由模型试验的相似分析^[8]可知，在几何相似条件下，当比值 $K/\mu V$ (K 为渗透系数、 μ 为给水度、 V 为退水速度) 为某一常值时，浸润线下降到相同的位置。这样，可以得到一条 E 与 $K/\mu V$ 的关系曲线(见图 6)，该曲线可以反映孔压消散的相对快慢关系。

图 6 中实线反映的是试验水位降低至终降水位时孔压消散指标 E 和降速评价指标 $K/\mu V$ 关系，其中 μ 按参考文献[1, 8]研究得到的经验公式推求。图中曲线在 $K/\mu V$ 取对数条件下满足逻辑增长型函数关系，有

$$E = a / \left[1 + b e^{-c \lg \left(\frac{K}{\mu V} \right)} \right] \quad (2)$$

式中： a 、 b 、 c 为参数，本研究中 $a=100$ 。

很明显，如假定渗流坡降 $J=1$ ，则 KJ/μ 表示坡体内水流质点的真实渗流速度， $K/\mu V$ 则可理解为土体孔隙中水流质点消散速度与水位降落速度间的比值关系。当 $K/\mu V$ 趋向于 0 时， E 趋近于 0，意味着坡体内自由面在水位下降过程中接近不变，自然趋向于骤降状态；当 $K/\mu V$ 趋向于无穷时， E 趋近于 100%，意味着水位下降的同时孔压几乎消散完毕，因而趋向于缓降状态。

实际上, 骤(缓)降状态永远达不到。严格地说, 通常所指的骤(缓)降应属于准骤(缓)降的概念。当堤身内渗流自由面在水位降落后仍保持有总水头的 90%左右(对应 E 值为 10%), 近似认为堤身浸润线基本保持不变^[1, 8], 已达到骤降状态; 当堤身内渗流自由面在水位降落后仍保持有总水头的 10%左右(对应 E 值为 90%), 已不致影响堤岸稳定^[1, 8], 视为缓降状态, 此时不需要进行临水坡水位降落稳定计算; 处于两者之间的为中间状态, 需要用非稳定渗流方法

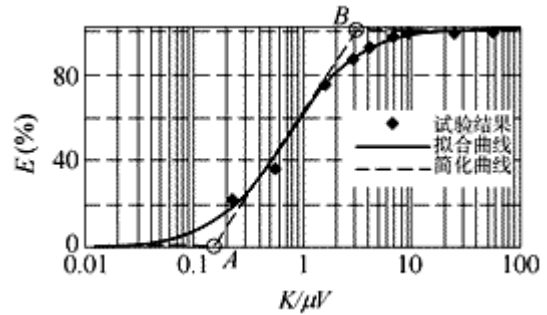


图 6 E 和 $K/\mu V$ 关系曲线

或经验近似公式^[1]计算浸润线位置, 以用于临水坡的稳定分析。这样, 根据 E 与 $K/\mu V$ 关系曲线可以得到骤降评价界限值和缓降评价界限值, 同时 E 与 $K/\mu V$ 关系曲线可简化成类似于图 6 虚线所示的三折线曲线。由图 6 可得, 在终降水位与坡高比值 $h_2/h=0.125$ 、水位的降幅与坡高比值 $h'/h=0.75$ 和补给源水位与坡高比值 $h_1/h=0.875$ 的前提下, 骤降评价界限值 $(K/\mu V)_r$ 等于 0.13 和缓降评价界限值 $(K/\mu V)_s$ 等于 3.43。这意味着当 $K/\mu V \leq 0.13$ 时(在 A 点以左), 可按水位骤降考虑; 而当 $K/\mu V \geq 3.43$ 时(在 B 点以右), 可按水位缓降考虑。

这样, 利用逻辑增长型函数的特点可以得到一种求解退水速度判别指标界限值的简化方法。如图 6 所示, 过曲线反弯点($E=50\%$ 处)作切线, 交直线 $E=0$ 和直线 $E=100\%$ 于 A、B 两点, A、B 点对应的 E 值分别恒等于 $a/(1+e^2)$ 和 $a/(1+e^{-2})$ 。本研究中 $a=100$, 有 $a/(1+e^2) \approx 10\%$ 和 $a/(1+e^{-2}) \approx 90\%$, 所以 A、B 点对应的 $K/\mu V$ 横坐标值分别对应骤降评价界限值 $(K/\mu V)_r$ 和缓降评价界限值 $(K/\mu V)_s$ 。

5 降速评价指标界限值的影响因素

实际上, 在河道水位降落过程中, 如土体密度、水位降落的幅度 h' 、背水侧补给源水位 h_1 、边坡的坡率 m 等, 都会对坡体渗流产生影响而影响降速评价指标界限值。

5.1 密实度 砂土的排水能力与其密实度息息相关。由文献[8]可知, 排泄水量能力主要与渗透系数 K 和孔隙率 n 有关。为了分析密实度对评价界限值的影响, 实测了不同密实度状态下砂土的渗透系数及孔隙率。试验坡体砂土 $D_r=0.68$, 属于密实砂, 其渗透系数 $K_0=1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 孔隙率 $n_0=0.43$, 用于对比分析的试验坡体采用人工捣实方法制备, 使其尽量密实。其砂土 $D_r=0.90$, 渗透系数为 $K_1=5.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 孔隙率为 $n_1=0.35$ 。图 7 是两组试验的 E 与 $K/\mu V$ 关

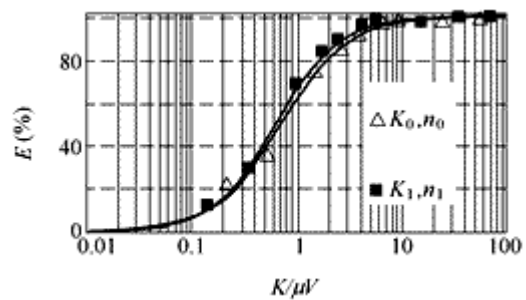


图 7 密实度对评价指标的影响

系曲线, 其中对比试验的结果是由有限元计算得到的。结果表明, 对于密实砂土来说, 相对密实度变化对缓(骤)降评价界限值的影响较小, 因此可以忽略天然状态下砂土的较小的相对密实度变化对评价界限值的影响。相对密实度变化会导致渗透系数及孔隙率发生变化, 这说明天然状态下同一类砂土因较小的相对密实度差异引起的渗透系数及孔隙率差异对评价界限值的影响很小。

5.2 河道水位的降幅及补给源水位 借助于有限元计算分析, 运用正交试验法, 分别变动水位降幅及补给源水位借以分析其对评价界限值的影响。采用水位的降幅与坡高比值 h'/h 、补给源水位与坡高比值 h_1/h 以及终降水位与坡高比值 h_2/h 来表示水位之间的相对关系: 当 $h'/h+h_2/h > h_1/h$ 时, 河道高水位高于

补给源水位, 当 $h'/h+h_2/h < h_1/h$ 时, 河道水位低于补给源水位。补给源(池塘、小型水库等)位于地表, 其水位与坡高比值 h_1/h 一般较大, 故取较大的 h_1/h 值用于分析。图 8 及图 9 为终降水位与坡高比值 $h_2/h=0.125$ 条件下不同降幅及补给源水位对退水速度判别指标界限值影响关系。

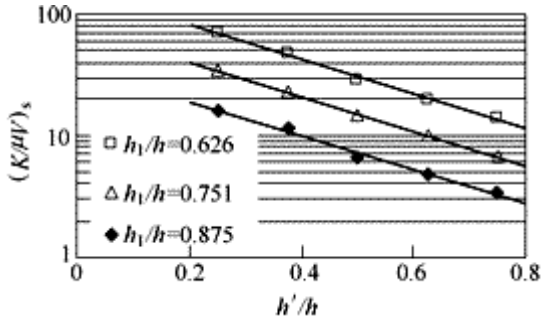


图 8 水位降幅及补给源水位对缓降指标值的影响

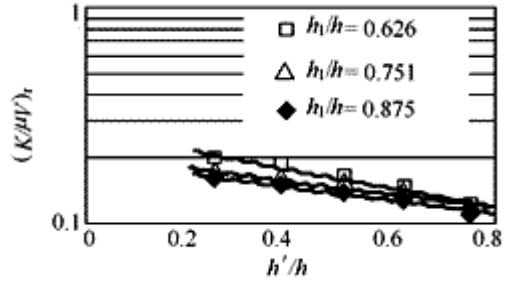


图 9 水位降幅及补给源水位对骤降指标值的影响

由图 8、图 9 可见, 退水速度判别指标界限值的对数值与水位降幅和补给源水位之间呈现很好的平行线性关系。终降水位和补给源水位不变时, 高水位值越低, 即水位的降幅越小, 退水速度判别指标界限值就越大。终降水位和降幅不变时, 补给源水位越高, 退水过程中补给源的补给作用就越明显, 达到骤(缓)降所需的退水速度就越大, 相应的退水速度判别指标界限值就越小。

通过正交试验分析, 可以得到三者之间的经验关系式, 进一步计算得到不同水位的降幅及补给源水位条件下的缓(骤)降评价界限值, 用以判断典型洪水期临水侧坡体内的渗流状况(骤降、缓降或是中间状态), 用于临水侧坡体稳定分析。公式具体如下。

缓降:
$$\text{Lg}(K/\mu V)_s = ah_1/h + b \quad (3)$$

式中: $a=0.3111h'/h-2.6583$; $b=-1.6534h'/h+3.8817$ 。

骤降:
$$\text{Lg}(K/\mu V)_r = ah_1/h + b \quad (4)$$

式中: $a=0.3238h'/h-0.3831$; $b=-0.5944h'/h-0.3693$ 。

6 结论

借助于大型室内模型试验和数值模拟方法, 对高水位长时间持续条件下不同退水情况进行了模拟研究, 提出了背水侧有补给源条件下均质土堤的水位降速评价指标界限值, 并分析了密实度、水位降幅及补给源水位对评价界限值的影响。从中得到: (1)采用坡体内水头即时消退面积与最终消退面积比值 E 作为孔压的消散程度指标, 可以真实地反映孔压消散情况; (2)线性退水条件下的孔压消散速度是非线性的; (3) E 与 $K/\mu V$ 关系曲线在 $K/\mu V$ 取对数条件下满足逻辑增长型函数, 并且根据逻辑增长型函数特点得到了一种求解退水速度判别指标界限值的简化方法; (4)对于密实砂土($D_r \geq 2/3$)来说, 可以忽略天然状态下较小的相对密实度变化对降速评价指标界限值的影响; (5)退水速度判别指标界限值的对数值与水位降幅和补给源水位之间呈现很好的平行线性关系, 并且可以通过正交试验分析得到三者之间的经验关系式。

参考文献:

- [1] GB50286-98, 堤防工程设计规范[S].
- [2] D.G 弗雷德隆德, H.拉哈尔佐.非饱和土力学[M].陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.519-542.
- [3] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1: 318-333.
- [4] 高骥, 雷光耀, 张锁春. 堤坝饱和和非饱和渗流的树枝分析[J]. 岩土工程学报, 1988, 11(6): 239-243.
- [5] 中国科学院土壤所物理室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1980.25-87.
- [6] Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am, 1980, 44(5): 892-898.
- [7] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resour. Res., 1976, 12: 513-522.
- [8] 毛昶熙. 电模拟试验与渗流研究[M]. 北京: 水利出版社, 1981.370-371.

Model study on discrimination parameter for drawdown velocity of dikeYU Xiang-juan¹, WANG Lu-jun¹, ZHANG Xing-nong², YING Qiang²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The variations of water head distribution in levee, which submerged in long term high flood level, in the process of different drawdown velocities are measured in model test. It is found that the relationship between the logarithmic index for assessing the drawdown velocity and the index expressing the pore water pressure dissipation obeys a logistic curve law. The critical discrimination index of drawdown velocity for levee with homogeneous soil under the condition of having recharge source in the land-side of the levee is deduced, and a simplified method for determining the critical discrimination index is proposed based on the logistic relationship. Furthermore, the influences of various factors on critical discrimination index of drawdown velocity are studied by means of FEM for unsteady seepage flow in the levee. The result shows that the logarithm of critical discrimination index of drawdown velocity is linearly related to the amplitude of water level variation and water level of recharge source.

Key words: model test; dike; drawdown velocities; discrimination parameter; unsteady flow

(责任编辑: 韩昆)