

DOI: 10.11779/CJGE201409001

双层地基上堤身的渗流计算

吴世余¹, 钱财富^{1, 2}

(1. 安徽省淮委水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 黏土层覆盖下卧砂层的双层地基, 在冲积平原的江河两侧普遍存在。对于双层堤基的渗流计算, 已有相应于各种边界条件下的系统理论解; 至于相应的堤本身的渗流计算, 迥异于均质堤基和不透水堤基条件下的分析计算, 理论解空缺。先按双层堤基计算出堤身下砂层的承压水位, 堤身中点断面的水位非常接近承压水位; 据此, 并为便于求解, 将整体堤身从中点断面分开为上下游两部分, 每一部分的上下游边界视为延伸至无穷远; 再应用保角变换法分别求出堤身上下游部分的渗流理论解。对于堤身上游坡 1:3、下游坡出逸点以下 1:5 在中国常见的坡比, 作出具体的数值计算和算例计算; 堤身的下游部分为安全分析的重点, 为应用方便计, 根据详细的数值计算结果, 提出一系列有一定精度的拟合式。经电拟试验结果比较, 这一简化理论解的精度可靠, 此外, 论文的计算分析结果完全可推广至地表为黏土层覆盖的多层堤基上的堤身的渗流计算, 也可推广至其它坡比的条件。

关键词: 渗流; 堤防; 双地层; 承压水

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1569-11

作者简介: 吴世余(1926-), 男, 教授级高级工程师, 从事土工和渗流研究工作。E-mail: qianfu66@163.com。

Seepage calculation for levees on foundation with double strata

WU Shi-yu¹, QIAN Cai-fu^{1, 2}

(1. Anhui and Huaihe River Water Resources Institute, Bengbu 233000, China; 2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At the both sides of rivers in alluvial plain, the double strata with of upper clay stratum over sand stratum are ubiquitous. For their seepage calculation, there are many systematic theoretical solutions with different boundary conditions. However, the corresponding seepage calculations of levees themselves are widely different from the conditions of homogeneous subgrade and impervious subgrade, whereas there are no theoretical solution. The confined water level in sand stratum under the levees is first calculated, the water level of the middle cross section of levee is almost equal to the confined water level. According to the above discussion, and for the convenience to solve the problem, the integral levee is divided from the middle cross section into two parts, i. e., upstream part and downstream part. For each part, the upstream and downstream boundaries are regarded as stretching to infinite, then by using the conformal translation method, the theoretical solutions of each part of the levee are derived. For the usual slope ratios of levees in China, upstream of 1:3 and downstream below the release point of 1:5, numeral results and illustrative example are given. For the downstream part of levees, which is the key place of safty analysis, a series of fitting formulae according to the detailed numeral results are given for convenient application. Compared with the results of electric analog tests, the simplified theoretical solutions possess higher precision. All the results can be extended fully to the levees on the multi-strata foundation with surface clay stratum, and to other slope ratios.

Key words: seepage; levee; double strata; confined water

0 引言

黏性土覆盖下卧砂层的双层堤基, 在冲积平原的江河两侧普遍存在。对于双层堤基的渗流计算, 已有相应于各种边界条件下的理论解, 至于相应的堤本身的渗流计算, 迥异于均质堤基和不透水堤基, 理论解空缺。本文将整体堤身分成上下游两部分, 分别应用保形映射法导出简化的理论解。经整体电拟试验验证,

解具有较高的精度。本文的计算方法和结果, 完全可以推广至地表为黏土层覆盖的多层堤基上堤身的渗流计算。

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1408085ME99); 水利部科技推广计划项目(TG1414)

收稿日期: 2014-02-17

1 计算分析方法

双层堤基上堤防及其尺度示如图 1。堤身系由滩地地表层黏土填筑, 故堤身和上覆黏土层的渗透系数基本同一, 设为 k ; 下卧砂层的渗透系数设为 k_0 。为简化承压水位的计算, 将堤身简化为位于堤中心打至黏土层底板的板桩, 据此, 承压水位的计算式为^[1-2]

$$\left. \begin{aligned} H_0 &= H \frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1} \tan h A_1 L}, \\ H_1 &= H - (H - H_0) \frac{\sin h A_1 (L - b/2)}{\sin h A_1 L}, \\ H_2 &= H_0 e^{-A_2 \frac{b}{2}}, \\ A_1 &= \sqrt{\frac{k}{k_0 T_0 T_1}}, \\ A_2 &= \sqrt{\frac{k}{k_0 T_0 T_2}}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, H 为上游水位 (下游地表为水位的基准零点), H_1 , H_0 , H_2 分别为砂层在堤踵点、中点和趾点处的承压水位, L 为堤中心至河岸砂层等效露头点的距离, b 为堤基宽度, T_1 , T_2 , T_0 分别为上下游黏土层和砂层的厚度。

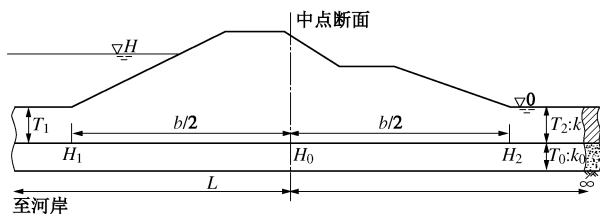


图 1 双层堤基上堤防的示意图

Fig. 1 Sketch map of levee on foundation with double strata

由于堤上游滩地有一定宽度 L , 下游双地层又延伸至很远, 故自踵、趾点向外延伸 T_1 , T_2 距离以内的堤基, 承压水位变化很小, 据式 (1) 计算的 3 点承压水位 H_1 , H_0 , H_2 很接近; 堤身中点断面竖向的各点水位又和承压水位 H_0 基本一致; 据此, 为便于求解,

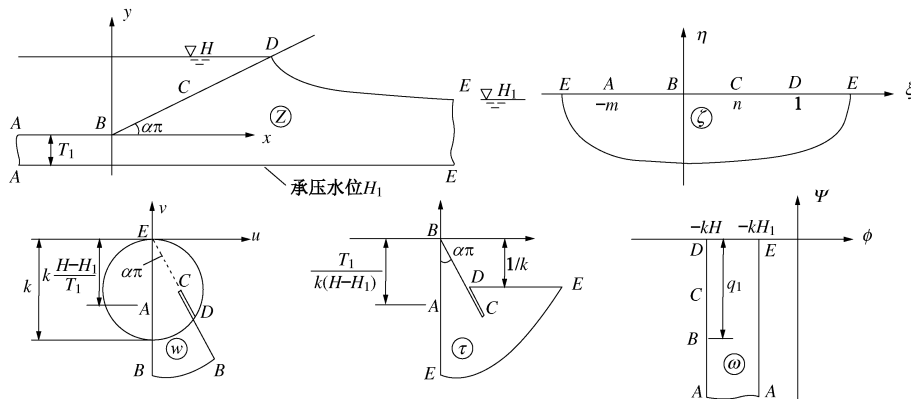


图 2 堤上游部分的映象平面

Fig. 2 Image planes of upstream part of levee

将整体堤身从中心断面分开为上下游两部分。每一部分的上下游边界视为延伸至无穷远; 上下游部分的承压水位可分别取 H_1 和 H_2 , 也可近似地取同一的中心点水位 H_0 ; 然后应用保形映射法分别导出上下游部分的理论解, 提出入渗坡降、浸润线、出逸点高度、出逸坡降、方向和流量等的计算式。最后将堤身上下游部分的解截取 $b/2$ 部分拼接, 浸润线在堤中心点两侧略有高差, 以和上下游浸润线相切的短线连接之。

对于在中国常见的坡比, 上游 1:3, 下游出逸点以下 1:5, 本文作出具体的数值计算和算例计算。堤身的下游部分为安全分析的重点, 为应用方便计, 根据详细的数值计算结果提出一系列有一定精度的拟合式。

2 堤上游部分的计算分析

堤上游部分的各映象平面示如图 2, 其定义如下:

$$\left. \begin{aligned} z &= x + iy, \\ w &= u + iv, \\ \tau &= \frac{1}{\bar{\omega}} = \frac{1}{u - iv}, \\ \zeta &= \xi + i\eta, \\ \omega &= \phi + i\psi = -kh + i\psi. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, z 为运动平面, w 为速度平面, τ 为共轭速度倒数平面, ζ 为辅助平面, ω 为复势平面, u , v 为水平和竖向的分速, h 为水位, ψ 为流函数。

2.1 τ , ω , z 平面的计算式

根据参考文献[3], 和手绘流网, 沿堤坡的入渗速度并非单调变化, 其间有一极小点, 据此导出各平面的计算式。

τ 的计算式:

BD 段

$$\tau = \frac{\sqrt{\pi}}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \frac{e^{(3/2+\alpha)\pi i}}{k \cos \alpha \pi} \int_0^\zeta \frac{n-\zeta}{\zeta^{1-\alpha}(1-\zeta)^{1/2+\alpha}} d\zeta. \quad (3)$$

BE 段

$$\tau = \frac{\sqrt{\pi}}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \frac{-i}{k \cos \alpha \pi} \int_0^S \frac{n+S}{S^{1-\alpha}(1+S)^{1/2+\alpha}} dS \quad (S=-\zeta) \quad (4)$$

DE 段

$$\tau = \frac{e^{(3/2+\alpha)\pi i}}{k \cos \alpha \pi} + \frac{\sqrt{\pi}}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \frac{1}{k \cos \alpha \pi} \int_1^\zeta \frac{\zeta-n}{\zeta^{1-\alpha}(\zeta-1)^{1/2+\alpha}} d\zeta \quad (5)$$

 ω 的计算式:

DE 段

$$\omega = \frac{2}{\pi} k(H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{\zeta-1}{1+m}} - kH \quad (6)$$

BD 段

$$\omega = -kH - \frac{2i}{\pi} k(H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{1-\zeta}{1+m}} \quad (7)$$

BA 段

$$\omega = -kH - \frac{2i}{\pi} k(H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{1+S}{1+m}} \quad (S=-\zeta) \quad (8)$$

AE 段

$$\omega = -kH_1 - \frac{2i}{\pi} k(H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{1+m}{1+S}} \quad (9)$$

 z 的计算如下式:

$$z = \int_0^\zeta \tau d\omega = [\tau\omega]_0^\zeta - \int_0^\zeta \omega d\tau \quad (10)$$

BD 段

$$z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{H-H_1}{\cos \alpha \pi} \frac{e^{\alpha \pi i}}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \left[\int_0^\zeta \arctan \sqrt{\frac{1-\zeta}{1+m}} \frac{n-\zeta}{\zeta^{1-\alpha}(1-\zeta)^{1/2+\alpha}} d\zeta - \arctan \sqrt{\frac{1-\zeta}{1+m}} \int_0^\zeta \frac{n-\zeta}{\zeta^{1-\alpha}(1-\zeta)^{1/2+\alpha}} d\zeta \right] \quad (11)$$

DE 段

$$z = H(\cot \alpha \pi + i) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{H-H_1}{\cos \alpha \pi} \frac{1}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \left[\arctan \sqrt{\frac{\zeta-1}{1+m}} \int_1^\zeta \frac{\zeta-n}{\zeta^{1-\alpha}(\zeta-1)^{1/2+\alpha}} d\zeta - \int_1^\zeta \arctan \sqrt{\frac{\zeta-1}{1+m}} \frac{\zeta-n}{\zeta^{1-\alpha}(\zeta-1)^{1/2+\alpha}} d\zeta \right] + (\tan \alpha \pi - i) \frac{2}{\pi} (H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{\zeta-1}{1+m}} \quad (12)$$

BA 段

$$z = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{H-H_1}{\cos \alpha \pi} \frac{1}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \left[\arctan \sqrt{\frac{1+S}{1+m}} \int_0^S \frac{n+S}{S^{1-\alpha}(1+S)^{1/2+\alpha}} dS - \int_0^S \arctan \sqrt{\frac{1+S}{1+m}} \frac{n+S}{S^{1-\alpha}(1+S)^{1/2+\alpha}} dS \right]$$

$$\int_0^S \arctan \sqrt{\frac{1+S}{1+m}} \frac{n+S}{S^{1-\alpha}(1+S)^{1/2+\alpha}} dS \quad (S=-\zeta) \quad (13)$$

式中, 和常见坡比 1:3 相应的各值为: $\alpha=0.1024164$, $\Gamma(\alpha)=9.27958$, $\Gamma(1/2-\alpha)=2.23198$ 。

2.2 待定常数、流量、浸润线和入渗坡降的计算

据式 (7) 得

$$q_1 = \frac{2}{\pi} k(H-H_1) \arctan \sqrt{\frac{1}{1+m}} \quad (14)$$

式中, q_1 为经边坡入渗的流量。先按手绘流网初估流量, 代入式 (14), 计算出 m 初值, 以此 m 值代入式

(4) 的积分上限, 并以 $\tau = \frac{-iT_1}{k(H-H_1)}$ 代入, 计算出 n

初值。以 $\zeta=1$ 代入式 (11), 并分开虚实部, 得

$$H = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (H-H_1) \frac{\tan \alpha \pi}{(n-2\alpha)\Gamma(\alpha)\Gamma(1/2-\alpha)} \int_0^1 \arctan \sqrt{\frac{1-\zeta}{1+m}} \frac{n-\zeta}{\zeta^{1-\alpha}(1-\zeta)^{1/2+\alpha}} d\zeta \quad (15)$$

以 m, n 初值代入式 (15), 视其是否和实际 H 值相符, 继续调整 m 值, 直至相符为止, 据以得出待定常数 m, n 和流量 q_1 。

以不同的 ζ 代入式 (12), 并分开虚实部, 即得出浸润线 DE 的各点坐标 x, y 。

以不同的 ζ 代入式 (3) 和式 (11), 据以计算出边坡 BD 各点的入渗坡降 I 。

以不同的 ζ 代入式 (4) 和式 (13), 据以计算出地表段 BA 的各点入渗坡降 I 。

计算式中的积分部分, 可先展为级数再积分。如级数不易收敛或不收敛, 那么初段和终段用近似函数式积分, 中段可应用 simpson^[4] 的数值积分式计算。

3 堤下游部分的计算分析

堤下游部分的各映象平面示如图 3, 其定义如下式

$$\left. \begin{aligned} z &= x + iy, \\ w &= u + iv, \\ p &= \frac{1}{\bar{w} - ik} = \frac{1}{u - i(v+k)}, \\ \theta &= \omega - ikz = \phi + k y + i(\psi - k x), \\ \theta' &= e^{-\pi i/2} \theta, \\ \zeta &= \xi + i\eta. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中, z, w, ζ 平面的定义同于堤上游部分, p 平面为共轭速度减去 ik 后的倒数, θ 为复势平面减去 ikz , 称茹可夫斯基函数平面^[3], θ' 为 θ 向后转 90° 的平面。

3.1 p, θ', ω, z 平面的计算式

 p 的计算式:

GF 段

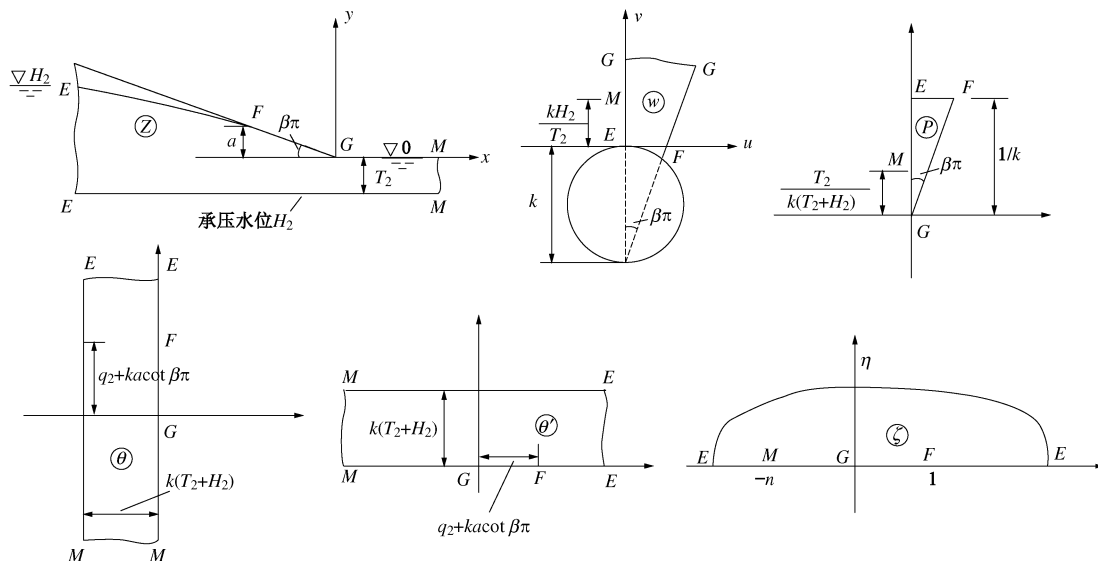


图3 堤下游部分的映象平面

Fig. 3 Image planes of downstream part of levee

$$p = \frac{\sqrt{\pi} e^{(1/2-\beta)\pi i}}{k \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)} \cdot \int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} \quad (17)$$

GM 段

$$p = \frac{\sqrt{\pi} i}{k \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)} \int_0^S \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \quad (S = -\zeta) \quad (18)$$

FE 段

$$p = \frac{i}{k} + \frac{\sqrt{\pi}}{k \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)} \int_0^t \frac{dt}{t^{1/2} (1-t)^{1/2+\beta}} \quad (t = 1/\zeta) \quad (19)$$

 θ' 的计算式:

$$\left. \begin{aligned} GF \text{ 段} \quad \theta' &= \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} \ln \frac{\zeta + n}{n}, \\ GM \text{ 段} \quad \theta' &= \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} \ln \frac{n - S}{n} \quad (S = -\zeta), \\ FE \text{ 段} \quad \theta' &= \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} \ln \frac{1 + n t}{n t} \quad (t = 1/\zeta). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

按式 (16) 导出 ω 式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dz} &= \frac{d\omega}{dz} - ik = \bar{w} - ik, \\ dz &= p d\theta, \\ \omega &= \theta + ikz = i \int d\theta' - \int k p d\theta' = \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} \cdot \int_0^\zeta (i - kp) \frac{d\zeta}{\zeta + n} + \omega(0). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中, $\omega(0)$ 为积分起点的 ω 。以 GF、GM、FE 段的 p 式 (17)、(18)、(19) 代入式 (21), 得出相应的 ω 式:

GF 段

$$\omega = \frac{-k(T_2 + H_2) e^{(1/2-\beta)\pi i}}{\sqrt{\pi} \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)}.$$

$$\int_0^\zeta \left(\int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} \right) \frac{d\zeta}{\zeta + n} + \frac{k(T_2 + H_2) i}{\pi} \ln \frac{\zeta + n}{n} \quad (22)$$

GM 段

$$\omega = i\psi = \frac{k(T_2 + H_2) i}{\sqrt{\pi} \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)} \cdot \int_0^S \left(\int_0^S \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dS}{n - S} - \frac{k(T_2 + H_2) i}{\pi} \ln \frac{n}{n - S} \quad (S = -\zeta) \quad (23)$$

FE 段

$$\omega = iq_2 - kH_2 + \frac{k(T_2 + H_2)}{\sqrt{\pi} \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2-\beta)} \cdot \int_0^t \left(\int_0^t \frac{dt}{t^{1/2} (1-t)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dt}{t(1 + nt)} \quad (t = 1/\zeta) \quad (24)$$

式中, q_2 为边坡渗出的流量, H_2 为承压水位。按式 (16)、(20)、(21) 导出 z 式:

$$z = \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} i \int_0^\zeta p \frac{d\zeta}{\zeta + n} \quad (25)$$

以 GF、GM 的 p 式代入式 (25), 得出相应的 z 式:

GF 段

$$z = \frac{(T_2 + H_2) e^{(1-\beta)\pi i}}{\sqrt{\pi} \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1-\beta)} \cdot \int_0^\zeta \left(\int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} \right) \frac{d\zeta}{\zeta + n} \quad (26)$$

GM 段

$$z = \frac{(T_2 + H_2)}{\sqrt{\pi \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1 - \beta)}} \cdot \int_0^s \left(\int_0^s \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dS}{n-S} \quad (S = -\zeta) \quad (27)$$

按式 (16)、(21)、(24) 导出 FE 段的 z 式

$$z = \frac{-i\omega}{k} - \frac{\theta'}{k} = \frac{-(T_2 + H_2)i}{\sqrt{\pi \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1 - \beta)}} \cdot \int_0^t \left(\int_0^t \frac{dt}{t^{1/2} (1-t)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dt}{t(1+nt)} + iH_2 + q_2/k - \frac{T_2 + H_2}{\pi} \ln \frac{1+nt}{nt} \quad (t = 1/\zeta) \quad (28)$$

分离式 (28) 的虚实部, 得

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{T_2 + H_2}{\pi} \ln \frac{1+nt}{nt} + \frac{q_2}{k}, \\ y &= H_2 - \frac{T_2 + H_2}{\sqrt{\pi \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2 - \beta)}} \cdot \int_0^t \left(\int_0^t \frac{dt}{t^{1/2} (1-t)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dt}{t(1+nt)}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中, 和常见坡比 1:5 相应的各值为 $\beta = 0.062833$, $\Gamma(\beta) = 15.39679$, $\Gamma(1/2 - \beta) = 2.026369$.

3.2 待定常数、流量、出逸点、出逸坡降和浸润线的计算

以 M 点坐标 $S=n$ 代入式 (18) 的积分上限计算参数 n :

$$\frac{T_2}{T_2 + H_2} = \frac{\sqrt{\pi}}{\cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2 - \beta)} \int_0^n \frac{ds}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \quad (30)$$

以 $\zeta=1$ 代入式 (22) 计算出逸点高度 a 和边坡的渗出流量 q_2 :

$$\omega = -ka + iq_2 = \frac{-k(T_2 + H_2)e^{(1/2-\beta)\pi i}}{\cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1/2 - \beta)} \cdot \int_0^1 \left[\int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} \right] \frac{d\zeta}{\zeta+n} + \frac{k(T_2 + H_2)}{\pi} i \ln \frac{1+n}{n} \quad (31)$$

按式 (16)、(17) 导出边坡 GF 的出逸坡降式

$$\frac{1}{kp} = \frac{u - i(v+k)}{k} = \frac{u}{k} - i \frac{v}{k} - i = -I_x + iI_y - i = \frac{\sin \beta \pi - i \cos \beta \pi}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} \quad (32)$$

分开上式的虚实部, 得

$$\left. \begin{aligned} -I_x &= \frac{\sin \beta \pi}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}}, \\ -I_y &= \frac{\cos \beta \pi}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\zeta^{1-\beta} (1-\zeta)^{1/2+\beta}} - 1. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中, I_x, I_y 分别为边坡出逸坡降的 x 向和 y 向的分量。再列出出逸坡降 I 及其和边坡的交角 σ 式:

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{I_x^2 + I_y^2}, \\ \sigma &= \beta \pi + \arctan \frac{I_y}{I_x}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

按式 (16)、(18) 导出地表段 GM 的出逸坡降式

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{kp} &= -I_x + iI_y - i \\ &= \frac{-i}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^s \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \\ I_x &= 0, \\ -I_y &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^s \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

地表段当 $x \geq T_2$, $-I_y$ 已十分接近 H_2/T_2 , 据此定义地表段渗出的附加流量 Δq 并按式 (16)、(20)、(27) 计算如下:

$$\begin{aligned} \Delta q &= \lim_{S \rightarrow n} (-\psi - k \frac{H_2}{T_2} x) \\ &= \lim_{S \rightarrow n} \left(k \frac{T_2 + H_2}{\pi} \ln \frac{n}{n-S} - k \frac{T_2 + H_2}{T_2} x \right) \\ &= \lim_{S \rightarrow n} \left[k \frac{T_2 + H_2}{\pi} \ln \frac{n}{n-S} - k T_2 (1 + H_2/T_2)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1 - \beta)}} \int_0^s \left(\int_0^S \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \right) \frac{dS}{n-S} \right]. \end{aligned}$$

式中前后项均趋于 ∞ , 后项运用分部积分消去大值项后, 剩下定值项为

$$\Delta q = k T_2 (1 + H_2/T_2)^2 \frac{1}{\sqrt{\pi \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1 - \beta)}} \cdot \int_0^n \ln \frac{n}{n-S} \frac{dS}{S^{1-\beta} (1+S)^{1/2+\beta}} \quad (35)$$

对于坡比 1:5, $H_2/T_2 \geq 0.3$ (相应 $n \leq 0.0577$),

可将式 (35) 展开级数积分, 略去微小项后, 得

$$\Delta q / kT_2 = (1 + H_2 / T_2)^2 \frac{1}{\sqrt{\pi} \cos \beta \pi \Gamma(\beta) \Gamma(1 - \beta)} \cdot (1.5735n^\beta - 0.5507n^{1+\beta}) \quad (36)$$

对于 $H_2/T_2 < 0.3$, 相应 $n > 0.0577$, 则须用数值积分计算。地表段当 $x > T_2$ 以远, 由于沿程渗出, 砂层流量渐小, 承压水位随之渐减, 故下游的实际流量 q 为^[1]

$$q = q_2 + \Delta q + A_2 H_2 K_0 T_0 \quad (37)$$

式中, K_0 , T_0 分别为砂层的渗透系数及层厚, A_2 见式 (1)。

浸润线 FE 的计算式见式 (29)。

以上各式的单积分计算方法同于堤上游部分。对于双重积分, 先将首次积分的被积函数展为级数并积分后, 再乘以二次积分被积函数展开的级数, 然后再积分而得。双重积分也可运用分部积分法化为单积分式计算。

3.3 坡比 1 : 5 条件下的具体数值计算

堤下游部分为安全分析的重点, 故按常见的 1 : 5 坡比作出详细的具体数值计算。为便于应用, 还提出相应的拟合式及其计算结果。

(1) 参数 n 的数值

按式 (30) 计算的参数 n 列于表 1。另提出拟合式如下:

$$n = \exp \left[-9.721 + 8.6(1 - H_2 / T_2) + 3.43(1 - H_2 / T_2)^4 - 0.06 \sin \frac{(H_2 / T_2 - 0.1)\pi}{0.15 + 0.18\sqrt{H_2 / T_2 - 0.25}} \right] (H_2 / T_2 = 0.1 \sim 1.0) \quad (38)$$

(2) 出逸点高度 a

按式 (31) 计算 a 列于表 2, 另提出拟合式如下:

表 1 参数 n

Table 1 Parameter n

H_2/T_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
n 式 (30)	1.29	0.223	0.0577	0.0174	0.00576
n 式 (38)	1.31	0.224	0.0568	0.0172	0.00577
H_2/T_2	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
n 式 (30)	0.00206	0.000783	0.000315	0.000133	0.0000590
n 式 (38)	0.00206	0.000784	0.000317	0.000135	0.0000594

表 2 出逸点高度 a

Table 2 Height of release point a

H_2/T_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
a/H_2 式 (31)	0	0.348	0.548	0.656	0.718	0.757	0.786	0.803	0.817	0.828	0.837
a/H_2 式 (39)	0	0.348	0.544	0.657	0.723	0.763	0.789	0.805	0.817	0.827	0.837

表 3 从边坡渗出的流量 q_2

Table 3 Discharge q_2 exiting from slope

H_2/T_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
q_2/kH_2 式 (31)	0	0.270	0.507	0.735	0.947	1.146	1.335	1.515	1.688	1.854	2.013
q_2/kH_2 式 (40)	0	0.272	0.508	0.729	0.941	1.143	1.335	1.518	1.692	1.859	2.013

$$a / H_2 = 0.8374 \left[1 - (1 - H_2 / T_2)^{5.5 - 4H_2 / T_2} \right] \quad (39)$$

(3) 边坡渗出的流量 q_2

按式 (31) 计算 q_2 列于表 3, 另提出拟合式如下:

$$q_2 / kH_2 = 2.0127 \left(\frac{H_2}{T_2} \right)^{0.882 - 0.13(H_2 / T_2)} \left(\frac{H_2}{T_2} \leq 1 \right) \quad (40)$$

(4) 地表段渗出的附加流量 Δq

按式 (35) 计算 Δq 列于表 4, 另提出拟合式如下:

$$\Delta q / kT_2 = 0.0313 \left(1 + \frac{H_2}{T_2} - e^{-14H_2 / T_2} \right) \left(\frac{H_2}{T_2} \leq 1 \right) \quad (41)$$

(5) 边坡出逸坡降 I 及其与边坡的交角 σ

按式 (32)、(33) 计算的 I 和 σ 列于表 5 和表 6,

另提出拟合式如下:

$$\left. \begin{aligned} I &= 0.196 + f_1 \left(\frac{H_2}{T_2}, \frac{a}{y} \right) - f_2 \left(\frac{H_2}{T_2}, \frac{y}{a} \right), \\ f_1 &= \left(0.025 + 0.36 \frac{H_2}{T_2} \right) \ln \frac{a}{y}, \\ f_2 &= 0.8 \left(\frac{H_2}{T_2} - 0.1 \right) \left(\frac{\ln y / a}{\ln 0.01} \right)^{1.45 + \frac{H_2}{2T_2}}, \\ &\left(\frac{H_2}{T_2} = 0.1 \sim 1.0 \right), \left(\frac{y}{a} \geq 0.01 \right), \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma^\circ &= \arctan \left[\bar{I} - \frac{0.2}{\bar{I} - 0.8} - \frac{\tanh(\bar{I} - 1)}{4\bar{I}} \right], \\ (\bar{I} &= I / 0.1961), \\ &\left(\frac{H_2}{T_2} \leq 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

(6) 地表的出逸坡降 I

I 按式 (34) 计算列于表 7, 另提出拟合式如下:

表 4 地表段的附加流量 Δq

Table 4 Additional discharge Δq of ground surface

H_2/T_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\Delta q/kT_2$ 式 (35)	0	0.0268	0.0362	0.0402	0.0438	0.0471	0.0503	0.0535	0.0568	0.0598	0.0630
$\Delta q/kT_2$ 式 (41)	0	0.0267	0.0357	0.0402	0.0437	0.0469	0.0501	0.0532	0.0563	0.0595	0.0626

表 5 边坡的出逸坡降 I

Table 5 Exit gradient I of slope

$H_2/T_2=1.0$									
y/a	0	0.0107	0.0712	0.2293	0.4452	0.6996	0.7839	0.9010	1.0
I 式 (33)	∞	1.271	0.974	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196
I 式 (42)	—	1.242	0.970	0.685	0.483	0.329	0.288	0.236	0.196
$H_2/T_2=0.9$									
y/a	0	0.00483	0.0431	0.1846	0.4089	0.6796	0.7694	0.8944	1.0
I 式 (33)	∞	1.271	0.974	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196
I 式 (42)	—	1.212	0.984	0.690	0.480	0.325	0.285	0.235	0.196
$H_2/T_2=0.8$									
y/a	0	0.0229	0.1353	0.3636	0.6540	0.7510	0.8859	1.0	
I 式 (33)	∞	0.974	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196	
I 式 (42)	—	0.990	0.703	0.479	0.322	0.282	0.233	0.196	
$H_2/T_2=0.7$									
y/a	0	0.0110	0.0861	0.3062	0.6199	0.7260	0.8741	1.0	
I 式 (33)	∞	0.974	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196	
I 式 (42)	—	0.983	0.721	0.482	0.321	0.281	0.233	0.196	
$H_2/T_2=0.6$									
y/a	0	0.00490	0.0470	0.2376	0.5753	0.6954	0.8595	1.0	
I 式 (33)	∞	0.974	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196	
I 式 (42)	—	0.963	0.738	0.490	0.320	0.279	0.232	0.196	
$H_2/T_2=0.5$									
y/a	0	0.0222	0.1602	0.5120	0.6462	0.8371	1.0		
I 式 (33)	∞	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196		
I 式 (42)	—	0.745	0.505	0.321	0.280	0.231	0.196		
$H_2/T_2=0.4$									
y/a	0	0.00957	0.0894	0.4236	0.5707	0.8032	1.0		
I 式 (33)	∞	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196		
I 式 (42)	—	0.711	0.522	0.327	0.284	0.232	0.196		
$H_2/T_2=0.3$									
y/a	0	0.00398	0.0427	0.3084	0.4703	0.7497	1.0		
I 式 (33)	∞	0.721	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196		
I 式 (42)	—	0.717	0.528	0.335	0.288	0.233	0.196		
$H_2/T_2=0.2$									
y/a	0	0.0194	0.1892	0.3411	0.6580	1.0			
I 式 (33)	∞	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196			
I 式 (42)	—	0.516	0.342	0.292	0.235	0.196			
$H_2/T_2=0.1$									
y/a	0	0.00967	0.1103	0.2229	0.5399	1.0			
I 式 (33)	∞	0.502	0.330	0.288	0.235	0.196			
I 式 (42)	—	0.479	0.331	0.288	0.234	0.196			

表 6 出逸方向和边坡的交角 σ

Table 6 Intersection angle σ between exit direction and slope

$I/0.1961$	1.0	1.196	1.469	1.681	2.562	3.675	4.967	6.479	8.238	10.276	12.637	∞
σ° 式 (33)	0	33.25	47.07	53.48	67.03	74.21	78.39	81.12	83.03	84.42	85.46	90
σ° 式 (43)	0	33.04	47.61	53.79	67.03	74.22	78.39	81.13	83.03	84.42	85.46	90

表 7 地表的出逸坡降 I
Table 7 Exit gradient I of ground surface

$H_2/T_2=1.0$											
x/T_2	0	1.71×10^{-5}	1.98×10^{-4}	2.30×10^{-3}	2.79×10^{-2}	0.1995	0.2683	0.3580	0.4851	0.7055	0.9882
I 式(34)	∞	2.563	2.083	1.668	1.309	1.089	1.065	1.045	1.028	1.013	1.005
I 式(44)	∞	2.600	2.096	1.659	1.298	1.090	1.066	1.046	1.027	1.009	1.000
$H_2/T_2=0.9$											
x/T_2	0	1.24×10^{-5}	1.43×10^{-4}	1.66×10^{-3}	1.99×10^{-2}	0.1993	0.2680	0.3580	0.4847	0.7405	0.9962
I 式(34)	∞	2.451	1.986	1.584	1.236	0.985	0.962	0.943	0.927	0.913	0.905
I 式(44)	∞	2.480	1.996	1.574	1.223	0.985	0.963	0.943	0.926	0.909	0.900
$H_2/T_2=0.8$											
x/T_2	0	1.59×10^{-5}	1.84×10^{-4}	2.14×10^{-3}	2.59×10^{-2}	0.1980	0.2683	0.3580	0.4850	0.7041	0.9946
I 式(34)	∞	2.221	1.787	1.412	1.087	0.881	0.859	0.841	0.825	0.812	0.805
I 式(44)	∞	2.239	1.789	1.398	1.074	0.881	0.859	0.841	0.824	0.808	0.800
$H_2/T_2=0.7$											
x/T_2	0	1.72×10^{-5}	1.99×10^{-4}	2.31×10^{-3}	2.80×10^{-2}	0.1966	0.2684	0.3579	0.4849	0.7038	0.9847
I 式(34)	∞	2.028	1.620	1.267	0.962	0.776	0.755	0.738	0.724	0.711	0.704
I 式(44)	∞	2.038	1.616	1.251	0.949	0.776	0.756	0.738	0.723	0.708	0.700
$H_2/T_2=0.6$											
x/T_2	0	1.63×10^{-5}	1.89×10^{-4}	2.19×10^{-3}	2.65×10^{-2}	0.1913	0.2688	0.3581	0.4855	0.7033	0.9953
I 式(34)	∞	1.859	1.474	1.141	0.852	0.674	0.652	0.636	0.623	0.611	0.604
I 式(44)	∞	1.859	1.464	1.121	0.862	0.673	0.652	0.636	0.621	0.607	0.600
$H_2/T_2=0.5$											
x/T_2	0	1.75×10^{-5}	2.03×10^{-4}	2.36×10^{-3}	2.86×10^{-2}	0.1993	0.2682	0.3578	0.4899	0.7036	0.9946
I 式(34)	∞	1.668	1.309	0.998	0.729	0.566	0.549	0.534	0.521	0.510	0.504
I 式(44)	∞	1.659	1.293	0.976	0.714	0.566	0.548	0.533	0.519	0.507	0.500
$H_2/T_2=0.4$											
x/T_2	0	1.95×10^{-5}	2.26×10^{-4}	2.62×10^{-3}	3.21×10^{-2}	0.1994	0.2686	0.3580	0.4854	0.7032	0.9966
I 式(34)	∞	1.474	1.141	0.852	0.603	0.462	0.445	0.432	0.420	0.409	0.404
I 式(44)	∞	1.456	1.119	0.828	0.589	0.461	0.445	0.431	0.418	0.406	0.400
$H_2/T_2=0.3$											
x/T_2	0	1.75×10^{-5}	2.03×10^{-4}	2.36×10^{-3}	2.86×10^{-2}	0.1997	0.2688	0.3585	0.4858	0.7049	0.9956
I 式(34)	∞	1.309	0.998	0.729	0.496	0.357	0.341	0.329	0.318	0.308	0.303
I 式(44)	∞	1.283	0.972	0.704	0.482	0.355	0.341	0.328	0.317	0.306	0.300
$H_2/T_2=0.2$											
x/T_2	0	1.50×10^{-5}	1.74×10^{-4}	2.02×10^{-3}	2.43×10^{-2}	0.2005	0.2703	0.3603	0.4880	0.7089	1.0020
I 式(34)	∞	1.141	0.852	0.603	0.388	0.249	0.236	0.225	0.215	0.207	0.203
I 式(44)	∞	1.109	0.826	0.580	0.376	0.250	0.237	0.225	0.215	0.205	0.200
$H_2/T_2=0.1$											
x/T_2	0	1.73×10^{-5}	2.00×10^{-4}	2.32×10^{-3}	2.82×10^{-2}	0.2046	0.2739	0.3644	0.4933	0.7171	1.0115
I 式(34)	∞	0.904	0.648	0.426	0.239	0.135	0.125	0.117	0.111	0.105	0.102
I 式(44)	∞	0.882	0.636	0.422	0.245	0.143	0.132	0.122	0.113	0.104	0.100

$$\left. \begin{aligned} &x/T_2\geqslant 1, I\approx\frac{H_2}{T_2}, \\ &x/T_2\leqslant 1, I=\frac{H_2}{T_2}+\left[0.02+0.024\frac{H_2}{T_2}-\right. \\ &\quad \left.0.02\exp(-10\sqrt{H_2/T_2})\right]\left(\ln\frac{T_2}{x}\right)^{1.5}, \\ &\quad\left(\frac{H_2}{T_2}=0.04\sim 1\right)。 \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

(7) 浸润线 FE
浸润线按式 (29) 计算见表 8, 另提出拟合式如下:
$$\left. \begin{aligned} &y/H_2=1-(1-a/H_2)\cdot \\ &\quad \exp\left[-C(x/T_2-5a/T_2)^{0.945+0.025H_2/T_2}\right], \\ &C=0.845+0.41(1-H_2/T_2)+0.41(1-H_2/T_2)^2 \\ &a/H_2=0.8374\left[1-(1-H_2/T_2)^{5.5-4H_2/T_2}\right], \\ &\quad\left(\frac{H_2}{T_2}=0.1\sim 1\right)。 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

表 8 浸润线 FE 的坐标
Table 8 Coordinates of phreatic line FE

$H_2/T_2=1.0$											
$-x/T_2$	4.19 4.19	4.27	4.72	5.58	6.74	7.62	8.50	10.55			
y/H_2 式 (29)	0.837	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999			
y/H_2 式 (45)	0.837	0.849	0.897	0.949	0.980	0.990	0.995	0.999			
$H_2/T_2=0.9$											
$-x/T_2$	3.73 3.72	3.86	4.30	5.11	6.21	7.04	7.83	9.83			
y/H_2 式 (29)	0.828	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999			
y/H_2 式 (45)	0.827	0.848	0.898	0.949	0.980	0.990	0.995	0.999			
$H_2/T_2=0.8$											
$-x/T_2$	3.27 3.27	3.46	3.88	4.66	5.69	6.46	7.25	9.15			
y/H_2 式 (29)	0.817	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999			
y/H_2 式 (45)	0.817	0.850	0.898	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999			
$H_2/T_2=0.7$											
$-x/T_2$	2.81 2.82	3.05	3.46	4.19	5.19	5.94	6.69	8.42			
y/H_2 式 (29)	0.803	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999			
y/H_2 式 (45)	0.805	0.848	0.898	0.950	0.981	0.990	0.995	0.999			
$H_2/T_2=0.6$											
$-x/T_2$	2.35 2.37	2.41	2.65	3.04	3.75	4.68	5.38	6.08	7.73		
y/H_2 式 (29)	0.784	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999		
y/H_2 式 (45)	0.789	0.800	0.847	0.899	0.951	0.981	0.991	0.995	0.999		
$H_2/T_2=0.5$											
$-x/T_2$	1.89 1.91	2.04	2.30	2.67	3.32	4.18	4.83	5.49	7.05		
y/H_2 式 (29)	0.757	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999		
y/H_2 式 (45)	0.763	0.800	0.852	0.903	0.952	0.981	0.991	0.995	0.999		
$H_2/T_2=0.4$											
$-x/T_2$	1.44 1.45	1.69	1.93	2.28	2.89	3.70	4.32	4.95	6.38		
y/H_2 式 (29)	0.718	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999		
y/H_2 式 (45)	0.723	0.800	0.856	0.902	0.954	0.981	0.991	0.995	0.999		
$H_2/T_2=0.3$											
$-x/T_2$	0.983 0.985	1.07	1.36	1.59	1.92	2.50	3.25	3.82	4.39	5.73	
y/H_2 式 (29)	0.655	0.700	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999	
y/H_2 式 (45)	0.657	0.698	0.797	0.850	0.902	0.953	0.981	0.991	0.995	0.999	
$H_2/T_2=0.2$											
$-x/T_2$	0.548 0.544	0.81	1.10	1.31	1.61	2.14	2.84	3.36	3.89	5.13	
y/H_2 式 (29)	0.548	0.700	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999	
y/H_2 式 (45)	0.544	0.707	0.800	0.850	0.901	0.951	0.981	0.990	0.995	0.999	
$H_2/T_2=0.1$											
$-x/T_2$	0.174 0.174	0.30	0.62	0.89	1.08	1.35	1.84	2.47	2.95	3.43	4.57
y/H_2 式 (29)	0.348	0.500	0.700	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.995	0.999
y/H_2 式 (45)	0.348	0.475	0.682	0.789	0.841	0.893	0.947	0.978	0.989	0.994	0.999

4 算 例

堤防的数据(见图 1): $L=500\text{ m}$, $b=60\text{ m}$, $T_1=T_2=5\text{ m}$, $T_0=40\text{ m}$, $H=5.5\text{ m}$, $k_0/k=2000$, 上游坡 1:3, 下游坡 1:5。按提供的数据计算, $A_1=A_2=1/632\text{ m}$, $H_1=3.470\text{ m}$, $H_0=3.315\text{ m}$, $H_2=3.161\text{ m}$ 。 H_1 , H_0 , H_2 差别不大,为简化计算,取均值 H_0 ,即 $H_1=H_2=H_0=3.315$

- m。按此分别进行堤身上下游部分的渗流计算。
- 4.1 堤身上游部分的计算结果(见图 2)
- (1) 参数 m , n 及边坡段的入渗流量 q_1 。 $m=0.000916$, $n=0.25230$, $q_1=1.056\text{ kH}$ (电拟为 1.053 kH)。
- (2) 浸润线 DE 。计算结果列于表 9。
- (3) 边坡 BD 的入渗坡降 I 。 I 垂直边坡向外, 计算结果列于表 10。

(4) 地表 BA 的入渗坡降 I 。 I 方向向上, 计算结果列于表 11。

4.2 堤身下游部分的计算结果 (见图 3)

(1) 参数 n 、出逸点高度 a 和流量 q_2 。 $n=0.001112$, $a=2.642\text{ m}$ (电拟 2.7 m), $q_2=0.868\text{ kH}$ (电拟 0.86 kH), $\Delta q=0.047\text{ kH}$, $q_0=A_2H_2k_0T_0=0.0050\text{ k}_0T_0$, $q=q_2+\Delta q+q_0=0.915\text{ kH}+0.0050\text{ k}_0T_0$, 式中 q_2 为边坡出逸的流量, Δq 为附加流量, q_0 为砂层在 G 断面的流量, q 为堤下游的总流量。

(2) 浸润线 EF 。 计算结果列于表 12。
浸润线中心点水位, 按上游计算为 3.44 m , 按下游计算为 3.29 m , 尚差 0.15 m , 平均为 3.365 m , 须以相切于上下游浸润线的一短线连接之。下游坡的稳定分析, 孔隙水压可近似地按垂直向线性分布计算。

(3) 边坡的出逸坡降 I 及出逸角 σ 。 计算结果列于表 13。

(4) 地表 GM 的出逸坡降 I 。 I 方向向下, 计算结果列于表 14。

表 9 浸润线 DE 的坐标

Table 9 Coordinates of phreatic line DE							
x/m	16.50	16.98	17.30	18.03	18.90	20.07	21.99
y/m 计算	5.50	5.07	4.92	4.64	4.41	4.17	3.90
y/m 电拟	5.50	5.00	4.90	4.63	4.39	4.10	3.85
x/m	23.62	25.36	26.73	29.54	30.00	31.37	33.61
y/m 计算	3.74	3.62	3.51	3.45	3.44	3.41	3.38
y/m 电拟	3.75	3.61	3.54	3.42	3.40	3.38	3.33

表 10 边坡 BD 的入渗坡降 I

Table 10 Infiltration gradient I of slope BD											
x/m	0	0.113	0.554	4.025	7.720	11.311	15.149	15.695	16.316	16.451	16.500
y/m	0	0.038	0.185	1.342	2.573	3.770	5.050	5.232	5.439	5.484	5.500
I 计算	∞	0.549	0.465	0.343	0.291	0.269	0.346	0.405	0.616	0.779	0.949
I 电拟	—	—	0.46	0.35	0.29	0.27	0.34	0.42	0.61	—	—

表 11 地表 BA 的入渗坡降

Table 11 Infiltration gradient I of ground surface BA							
$-x/\text{m}$	0	0.010	0.133	1.09	3.06	6.09	∞
I 计算	∞	0.694	0.549	0.465	0.443	0.438	0.437
I 电拟	—	—	—	0.47	0.46	0.45	0.44

表 12 浸润线 EF 的坐标

Table 12 Coordinates of phreatic line EF								
$-x/\text{m}$	13.21	14.51	16.52	20.14	25.01	28.78	30.00	32.32
y/m 计算	2.64	2.82	2.98	3.15	3.25	3.28	3.29	3.30
y/m 电拟	2.64	2.80	3.00	3.12	3.25	3.35	3.40	3.48

表 13 边坡 FG 的出逸坡降 I 及出逸角 σ

Table 13 Exit gradient I and Exit angle σ of slope FG									
$-x/\text{m}$	0	0.013	0.132	0.528	1.321	2.642	5.284	9.247	13.210
I 计算	∞	1.24	0.95	0.79	0.67	0.57	0.43	0.29	0.1961
I 电拟	—	—	—	—	0.67	0.57	0.42	0.29	0.20
σ° 计算	90	81	77.5	75.5	72.5	69.5	63	47	0
σ° 电拟	—	—	—	—	74	68	63	47	0

表 14 地表 GM 的出逸坡降

Table 14 Exit gradient I of ground surface GM											
x/m	0	0.0005	0.005	0.05	0.2	0.5	1.0	2.0	3.5	5.0	∞
I 计算	∞	1.673	1.323	1.033	0.883	0.793	0.743	0.693	0.673	0.667	0.663
I 电拟	—	—	—	—	—	0.78	0.74	0.69	0.68	0.67	0.66

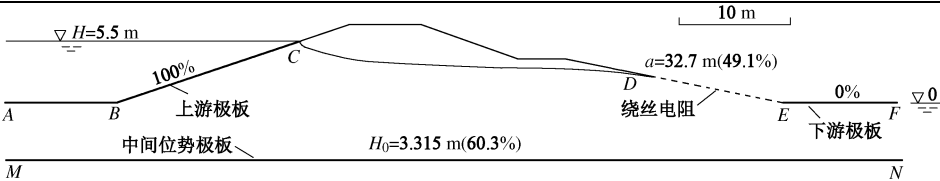


图 4 电拟模型布置图

Fig. 4 Arrangement of electric analog model

为验证计算结果,进行了堤身整体电拟试验。电拟试验模型布置如图4。上游水位 $H=5.5\text{ m}$, 位势100%, 下游水位0, 位势0%, 砂层顶板水位 $H_0=3.315\text{ m}$, 位势60.3%, 出逸点水位 $a=2.7\text{ m}$, 位势49.1%。砂层顶板和出逸点系中间位势,按串联电阻比值引出。浸润线按接续校正法测定,须控制每点的位势和高度相应,出逸点线段须和边坡相切。边坡出逸段置以绕线电阻,出逸点位势49.1%,坡脚位势0%,其间各点的位势也和高度相应。应用惠斯登电桥测出等势线分布,并添绘流线,即可据以计算流量分布。试验的结果已列于相应的表上和论文的相应处(急变处的坡降不易测定,未列)。

根据计算和试验的比较结果,在堤下游砂层无排水减压设施,堤身下堤基的承压水位基本一致条件下,将堤身分为上下游两部分分别进行理论计算的结果,和整体电拟试验结果,包括浸润线,出逸点高度,入渗和出逸坡降分布和方向,以及流量等均十分接近。据此论证了本文的计算方法有较高度的精度。

5 结 论

(1)将双层地基上堤身分为上下游两部分分别求解的方法和结果,适用于堤下游砂层中无排水减压设施的天然双层堤基。

(2)对于上游坡1:3、下游坡1:5的常见坡比,堤下游部分作了详细的数值计算,并提出了拟合式,

以便于应用。

(3)经和整体电拟试验对比验证,这一简化的理论解有较高的精度。

(4)本文的计算方法和计算式,完全可推广到多层堤基上的堤身;也可推广到其它的不同坡比,但有待于编程以简化计算。

参考文献:

- [1] 安徽省水利科学研究所. 多层地基和减压沟井的渗流计算理论[M]. 北京: 水利出版社, 1980: 20 - 23. (Anhui Water Resources Research Institute. Theory of seepage flow for calculating layered media and relief ditches and relief wells[M]. Beijing: Water Resources Press, 1980: 20 - 23. (in Chinese))
- [2] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (MAO Chang-xi. Dikes engineering manual [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 波卢巴里诺娃—柯钦娜П Я. 地下水运动原理[M]. 肖楠森, 任荣祖, 徐志英, 译. 北京: 地质出版社, 1957: 68 - 70, 160 - 161. (POLUBARINOVA—Kochima P Y. Theory of ground water movement[M]. XIAO Nan-sen, REN Rong-zu, XU Zhi-ying, trans. Beijing: Geology Press, 1957: 68 - 70, 160 - 161. (in Chinese))
- [4] SMITH P F. Mathematical texts of colleges[M]. Shanghai: Dragon Gate Press, 1946: 247 - 248.

海洋石油 708 船胜利完成 1720 m 超深水工程地质勘察作业

深水勘察船“海洋石油 708”继 2014 年 8 月 1 日完成水深 588 m, 海底泥面下 102 m 连续取心之后, 于 2014 年 8 月 13 日, 经过 7 天 7 夜的艰苦奋战, 在我国南海北部陆坡又完成了 1 个 1720 m 水深, 海底泥面下 101 m 连续取心任务, 圆满完成了“十二五”国家科技重大专项“南海深水油气开发示范工程项目”中“南海北部陆坡(荔湾 3-1 及周边)深水油气田地质灾害风险评价及开发工程设计”课题的 2 个深水 100 m 钻孔连续取心作业。

该项目是在中海油研究总院的领导下, 由中海油田服务股份有限公司物探事业部工程勘察中心精心组织和实施, 国家海洋局第一海洋研究所密切配合下顺利进行并圆满完成的, 成功克服作业区水深和不利天气等因素影响, 船舶动力定位、起吊设备、钻机和取样系统都经受住了超深水的考验。此次超深水钻探取心的胜利完成, 是我国海洋石油深水开发工程的又一重大突破, 它是我国首次依靠自己的船舶、钻井和取样设备在超过 1500 m 的超深水区域钻取的第一个工程地质钻孔, 标志着我

国已具备超深水勘察钻探取心技术、装备以及掌握超深水钻探取样的钻探队伍。

获取的岩心样品将用于“十二五”国家重大科技专项“南海北部陆坡区地质灾害风险评价预测”子任务的南海北部陆坡峡谷区的沉积物组成、沉积物从“源到汇”沉积过程、沉积环境及其演变过程、以及深水沉积物的工程特性等研究工作, 能为校准研究区的地震剖面提供标准, 评价的深水沉积物工程特性也为后继灾害地质评价、深水油气开发工程设施的选址、基础的设计和安装提供更为完备、准确可靠的岩土工程数据, 保障深水油气工程设施的安全。

深水勘察船“海洋石油 708”, 作为国家深水战略船舶之一, 可以在水深 3000 m 水域在海底钻孔 600 m 能力, 自投产以来, 这是第一次在超过 1720 m 水深钻孔 101 m, 可谓拥有屠龙手神功, 第一次小试牛刀。随着海洋石油向深海进军, 它的神功将会逐步得到表现, 它的定海神针会钻入更深的海域、更深海底。

(中海油物探事业部工程勘察中心 供稿)