

中国科学院 水利部
水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 10 集

(灌溉、排水)

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为水利水电科学研究院水利研究所近年来科研论文选集。内容包括：截渗沟、田间排水和地下排水技术的试验研究；渠系分水闸型式；喷灌、滴灌和渗灌技术；排水沟防塌措施；辐射井出水量计算；渠井结合灌溉；地下水资源评价和开发利用；水质分析和灌溉供水经济分析等科学研究成果。

本书可供从事灌溉、排水和水资源工作的科技和教学人员参考。

中国科学院
水利电力部
水利水电科学研究院
科学研究论文集

水利电力出版社出版

(北京德胜门外大街)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16印张 360千字

1982年12月第一版 1982年12月北京第一次印刷

印数0001—2850册 定价1.70元

书号 15143·5023

目 录

渠道和水库附近双沟截渗排水电拟试验与计算分析·····	瞿兴业 (1)
考虑地下水不同蒸发与埋深关系指数的田间排水沟间距计算·····	张友义 (31)
关于我国北方涝碱地区发展暗管排水的探讨·····	赖民基、张友义 (49)
南方五省市地下排水防治农田渍害的调查研究·····	瞿兴业、张友义、朱正文、陈庆平 (61)
合成纤维滤料包缠波纹塑料管的透水防沙性能试验·····	石凤霞 (74)
内蒙古后套灌区排水沟塌坡原因及其防治措施·····	魏永纯、邢东志、范定邦、王辰启 (82)
灌溉渠系分水闸结构型式试验研究·····	金永堂、李明湖等 (104)
节约能源的两种方形喷嘴·····	刘玉华、徐达、赵竞成 (124)
喷射末端水滴运动的稳定性条件及其平均直径的估算·····	赵竞成、刘玉华 (134)
滴灌设备的研制 ·····	邱为铎 (144)
滴灌自动控制仪的研制 ·····	王钢生 (157)
渗灌技术及其应用的研究·····	巫一清、侯舜祥、武文凤 (166)
黄土地区辐射井出水量计算方法探讨 ·····	瞿兴业 (178)
人民胜利渠灌区渠井结合灌溉分析研究·····	袁光耀、单炳忠、蔡林根 (188)
全国浅层地下水资源评价及开发利用现状 ·····	胡学华 (203)
灌溉供水成本效益计算方法的探讨 ·····	苏锦星 (220)
北京市坝河BOD 的自净作用及水质参数估算方法初步探讨·····	鲁光四 (230)

渠道和水库附近双沟截渗排水 电拟试验与计算分析

瞿 兴 业*

【提要】 本文对渠道和水库附近截排水渗流计算问题进行了探讨。通过理论推导,得出双沟排水作用下,自渠、库向两侧渗漏流量的计算公式,和各区间地下水水面线纵坐标的公式。文中应用电拟模型试验资料,验证了理论计算公式的正确性,并对截渗沟的合理布局及其降低地下水位的作用进行了分析,提出了有关截渗排水工程技术方面的一些具体建议。文中还将理论计算公式编成电算程序,通过电子计算机运算,得出46种组合方案的计算成果。

一、引 言

为发展工农业生产、交通运输和满足城市生活用水需要而进行的大规模调水,将会改变原来的生态平衡,引起自然环境要素的一系列变化。例如,从我国南方调水到北方地区,途经广大的干旱、半干旱平原,会不会由于长期输水而引起干线两侧的地下水位抬高,使大面积土地发生沼泽化、盐碱化,这是需要研究解决的重大科技问题。以东线调水方案为例,规划输水干线长度达到1100公里,其中水位高出地面的线段,占全线的20%左右。长期高水位输水,将产生大量的渗漏补给。据估算,用于农业灌溉的引水量中,输水损失(主要是渠道渗漏)将占16.7%。大量渗漏损失抬高附近的地下水位,尤其在黄河以北地区,极易造成土地沼泽化、盐碱化,严重危害农业生产。同时,为了适应北方平原地区春旱秋涝和农业用水比较集中的特点,适当采取平原蓄水工程措施,如利用天然地形建立有一定库容的平原水库,对输入水量进行调节,以解决水量在时间和空间上分配不均匀的问题。这样的平原水库,堤线长,侧向渗漏量大,同样也会引起附近地下水位抬高,造成土地沼泽化和盐碱化。如何防止这种影响,消除不利因素,变害为利,是生产当中需要解决的一个关键技术问题。

在渠道和水库附近设置截渗排水沟,保持沟中一定的低水位,能够降低附近地下水位,防止土地沼泽化和盐碱化,这已被一些地区的水利建设实践所证明。但怎样选择合理的布设方案,如何进行控制运用,还需研究截渗排水条件下的地下水运动特点,探讨其规律,才能得出科学的结论。本文就长期输水干渠和平原蓄水工程附近,平行设置两道截渗排水沟,降低地下水位的作用问题,进行理论分析计算,并通过电拟模型试验资料,验证

* 本文的理论分析与计算由瞿兴业完成;电拟试验及资料整理由吴允芳、杨碧如完成;电算程序的编制及运算工作由苏锦星完成。程序调试时曾得到自动化所系统软件组有关同志的帮助。

其理论计算方法的正确性。同时,论证不同情况下截渗排水的效益,探讨合理的截渗沟间距和水位控制深度等,以供工程规划设计中参考。

二、理论公式的推导

平原地区的大型输水渠道多为宽浅型,其宽深比值往往超过10以上,平原水库的宽深比值更大。为了简化理论计算,可将渠道和水库视作有限长度的水平等势源线,将截渗沟中心作为汇点,地下水向外侧出流的边界,则可作为铅直的等势汇线。由于渠道和水库水位长期接近稳定,波动幅度小,因此可视为恒定运动状态。其运动图式和边界条件见图1。通常,截渗排水影响区内的地下水面变幅,与含水层厚度比较,相对很小。因此,可以用简化成矩形的渗流域 $Z=x+iy$,来近似代替实际的渗流域,并绘出复速势平面 $\omega=\phi+i\psi$,和辅助半平面 $\zeta=\xi+i\eta$ 的图形,如图2(a)、(b)、(c)所示。

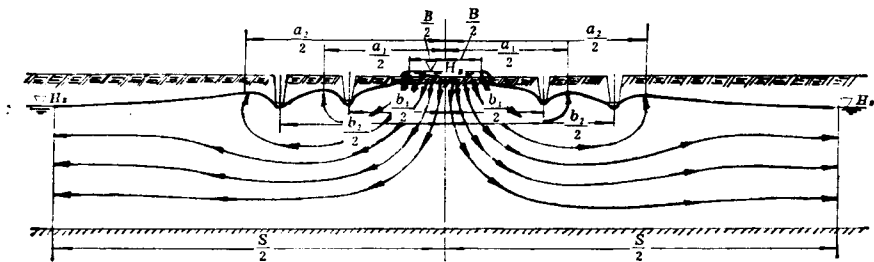


图1 渠道和水库两侧双沟截渗排水运动图式

应用复变函数保角变换法解题如下。

使用许瓦茨-克里斯托菲公式,将 Z 平面映射到 ζ 平面上

$$Z = A_1 \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} + c_1 = A_1 \operatorname{Arsh} \sqrt{\zeta^2 - 1} + c_1 \quad (1)$$

当 $\zeta = 1$, $Z = iT = c_1$; 当 $\zeta = 0$, $Z = 0 = iA_1 \frac{\pi}{2} + iT$, 由此得

$$A_1 = -\frac{2T}{\pi}, \quad Z = -\frac{2T}{\pi} \operatorname{Arsh} \sqrt{\zeta^2 - 1} + iT \quad (2)$$

式(2)可改写成
$$\zeta^2 = -\operatorname{sh}^2 \frac{\pi Z}{2T} \quad (3)$$

沿矩形渗流域的上边界(即直线化的地下水面线)有 $Z=x+iT$ 的条件。代入式(3)

得
$$\zeta_x^2 = \operatorname{ch}^2 \frac{\pi x}{2T} \quad (4)$$

将不同部位的 x 值(如 $x = \frac{B}{2}$ 、 $\frac{b_1}{2}$ 、 $\frac{b_1+d_1}{2}$ 、 $\frac{a_1}{2}$ …… $\frac{s}{2}$ 等)代入式(4),

可得出各相应的 ζ_x^2 表达式,其中,足号 x 分别用 $\frac{B}{2}$ 、 $\frac{b_1}{2}$ 、 $\frac{b_1+d_1}{2}$ …… $\frac{s}{2}$ 等代替。

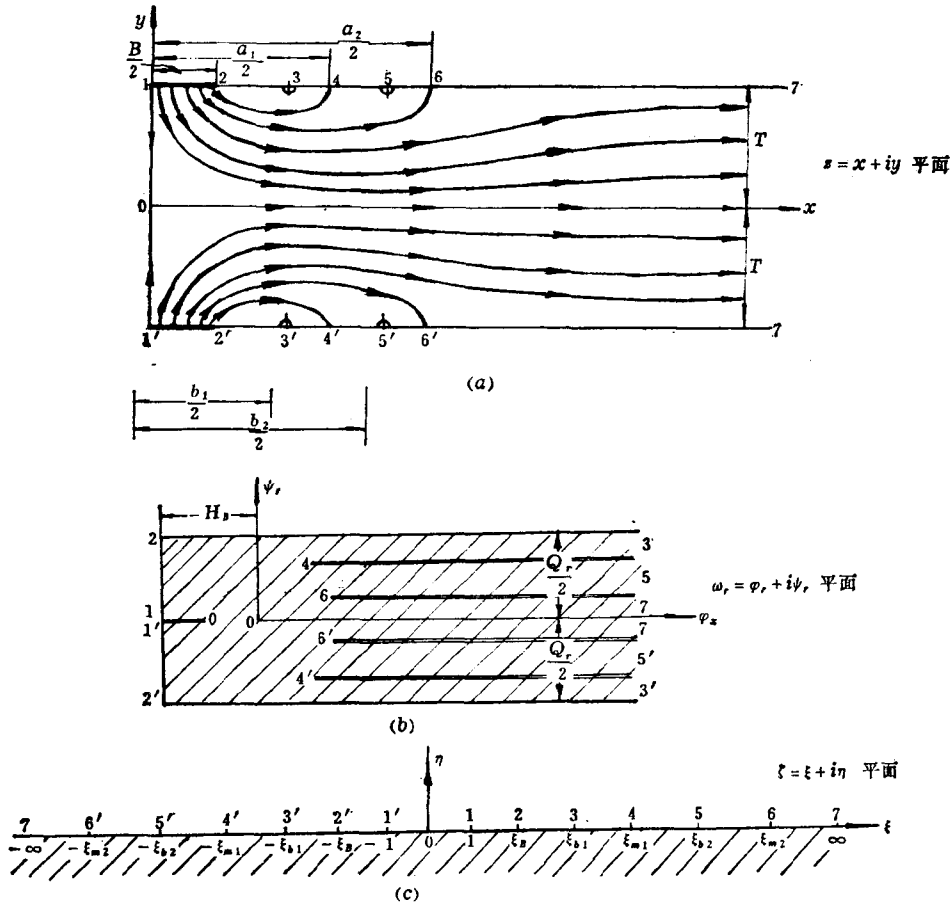


图 2 渗流计算复平面图

再使用许瓦茨-克里斯托菲公式，将 ω 平面映射到 ζ 平面上

$$\omega = A_2 \int_0^{\zeta} \frac{(\zeta^2 - \xi_{m1}^2)(\zeta^2 - \xi_{m2}^2)\zeta d\zeta}{(\zeta^2 - \xi_{b1}^2)(\zeta^2 - \xi_{b2}^2)\sqrt{(\zeta^2 - \xi_{b1}^2)(\zeta^2 - 1)}} + c_2 \quad (5)$$

用分项分式法求定积分，并用 ω 域和 ζ 域中有关条件确定常数 c_2 和系数 A_2 ，然后利用式 (3) 和式 (4) 表达的函数关系，及相应于不同 x 值的函数表达式，得到

$$\omega = \frac{Q_B}{\pi(1 + A_1 + A_2)} [f(Z) + A_1 F_1(Z) + A_2 F_2(Z)] + c_2 \quad (6)$$

式中 Q_B ——双沟截渗排水条件下，自渠道或水库向两侧渗漏的单长流量；

c_2 ——积分常数。在 $\xi_{\frac{B}{2}} \leq \zeta \leq \xi_{\frac{B}{2}}$ 区间

$$c_2 = -kH_B - i\frac{Q_B}{2} \quad (7)$$

式中 k ——含水层的渗透系数；

H_B ——渠道和水库的水位；

Q_B ——自渠道或水库向两侧渗漏的单长流量。

$$\Delta_1 = \frac{\left[\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi a_1}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right) - 1 \right] \left[\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi a_2}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right) - 1 \right]}{\left[\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right) - 1 \right] \sqrt{1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right)}} \quad (8)$$

$$\Delta_2 = \frac{\left[1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi a_1}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right) \right] \left[\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi a_2}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right) - 1 \right]}{\left[1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right) \right] \sqrt{1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right)}} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中的 a_1 、 a_2 为待定的未知量。

式(6)中的各函数,对于Z域的不同区间,有不同的表达式。在直线边界 $Z=x+iy$ (即地下水面线)上:

$$\text{当 } \frac{B}{2} \leq x \leq \frac{b_1}{2} \text{ 时, } f(Z)=f(x)=\operatorname{Arch}\left(\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2T} / \operatorname{sh} \frac{\pi B}{4T}\right) \quad (10)$$

$$F_1(Z)=F_1(x)=\operatorname{Arch} \sqrt{\frac{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T}\right)-1}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T}\right)-1}} \quad (11)$$

$$F_2(Z)=F_2(x)=\operatorname{Arch} \sqrt{\frac{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T}\right)-1}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T}\right)-1}} \quad (12)$$

当 $\frac{b_1}{2} \leq x \leq \frac{b_2}{2}$ 时, $f(Z)=f(x)$ 同式(10),

$$F_1(Z)=F_1'(x)=\operatorname{Arch} \sqrt{\frac{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T}\right)-1}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T}\right)-1}} \quad (13)$$

$F_2(Z)=F_2(x)$ 同(12),

当 $\frac{b_2}{2} \leq x \leq \frac{s}{2}$ 时, $f(Z)=f(x)$ 同式(10), $F_1(Z)=F_1'(x)$ 同式(13),

$$F_2(Z)=F_2'(x)=\operatorname{Arch} \sqrt{\frac{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T}\right)-1}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T}\right)-1}} \quad (14)$$

将式(10)~式(14)中的 x ,分别用不同部位各点的横坐标 $\left(\frac{B}{2}, \frac{b_1}{2}, \frac{b_1+d_1}{2}, \frac{a_1}{2}, \dots, \frac{s}{2}\right)$ 等)替换,即得相应各点的 f 和 F_1 、 F_2 函数表达式。

$$\text{引入渗流阻抗系数 } \phi(Z) = \frac{f(Z) + \Delta_1 F_1(Z) + \Delta_2 F_2(Z)}{\pi(1 + \Delta_1 + \Delta_2)} \quad (15)$$

$$\text{于是,式(6)简化为 } \omega = Q_B \cdot \phi(Z) - KH_B - i \frac{Q_B}{2} \quad (16)$$

同样,不同区间, $\phi(Z)$ 也具有不同形式的表达式。在地下水面线上:

$$\text{当 } \frac{B}{2} \leq x \leq \frac{b_1}{2} \text{ 时, } \phi(Z) = \phi(x) = \frac{f(x) + \Delta_1 F_1(x) + \Delta_2 F_2(x)}{\pi(1 + \Delta_1 + \Delta_2)} \quad (17)$$

$$\text{当 } \frac{b_1}{2} \leq x \leq \frac{b_2}{2} \text{ 时, } \phi(Z) = \phi'(x) = \frac{f(x) + \Delta_1 F'_1(x) + \Delta_2 F'_2(x)}{\pi(1 + \Delta_1 + \Delta_2)} \quad (18)$$

$$\text{当 } \frac{b_2}{2} \leq x \leq \frac{s}{2} \text{ 时, } \phi(Z) = \phi''(x) = \frac{f(x) + \Delta_1 F''_1(x) + \Delta_2 F''_2(x)}{\pi(1 + \Delta_1 + \Delta_2)} \quad (19)$$

同样, 用不同部位各点的横坐标, 替换式(17)~式(19)中的 x , 即得相应各点的 ϕ 函数表达式。

对式(16)作进一步推导, 应用 Z 域和 ω 域在 $x = \frac{B}{2}$ 和 $\frac{b_1 - d_1}{2}$ 两点的边界条件, 得出自渠道或水库向两侧渗漏单长流量的计算公式

$$Q_B = \frac{K(H_B - H_1)}{\phi\left(\frac{b_1 - d_1}{2}\right)} \quad (20)$$

式中 H_1 ——堤外第一道截渗沟中的水位;

$H_B - H_1$ ——第一区段的作用水头(用长度单位或%表示);

$\phi\left(\frac{b_1 - d_1}{2}\right)$ ——渗流阻抗系数, 用式(17)和(8)~(12)计算, 将其中的 x 全部换成 $\frac{b_1 - d_1}{2}$ 。

对式(16)再作进一步推导, 应用 Z 域和 ω 域在地下水面线上各部位的边界条件, 得出不同区间沿 x 轴地下水位 H_s 的计算公式:

$$\text{在 } \frac{B}{2} \leq x \leq \frac{b_1 - d_1}{2} \text{ 区间, } H_s = H_1 + (H_B - H_1) \left[1 - \frac{\phi(x)}{\phi\left(\frac{b_1 - d_1}{2}\right)} \right] \quad (21)$$

$$\text{在 } \frac{b_1 + d_1}{2} \leq x \leq \frac{a_1}{2} \text{ 区间, } H_s = H_1 + (H_{m_1} - H_1) \frac{\phi'\left(\frac{b_1 + d_1}{2}\right) - \phi'(x)}{\phi'\left(\frac{b_1 + d_1}{2}\right) - \phi'\left(\frac{a_1}{2}\right)} \quad (22)$$

$$\text{在 } \frac{a_1}{2} \leq x \leq \frac{b_2 - d_2}{2} \text{ 区间, } H_s = H_2 + (H_{m_1} - H_2) \frac{\phi'\left(\frac{b_2 - d_2}{2}\right) - \phi'(x)}{\phi'\left(\frac{b_2 - d_2}{2}\right) - \phi'\left(\frac{a_1}{2}\right)} \quad (23)$$

$$\text{在 } \frac{b_2 + d_2}{2} \leq x \leq \frac{a_2}{2} \text{ 区间, } H_s = H_2 + (H_{m_2} - H_2) \frac{\phi''\left(\frac{b_2 + d_2}{2}\right) - \phi''(x)}{\phi''\left(\frac{b_2 + d_2}{2}\right) - \phi''\left(\frac{a_2}{2}\right)} \quad (24)$$

$$\text{在 } \frac{a_2}{2} \leq x \leq \frac{s}{2} \text{ 区间, } H_s = H_s + (H_{m_2} - H_s) \frac{\phi''\left(\frac{s}{2}\right) - \phi''(x)}{\phi''\left(\frac{s}{2}\right) - \phi''\left(\frac{a_2}{2}\right)} \quad (25)$$

式中 H_{m_1} 和 H_{m_2} ——地下水面线上两个分流点的水位(峰值);

H_2 ——堤外第二道截渗排水沟中的水位;

H_s ——向外侧出流部位的地下水位;

$H_{m_1} - H_1$ 、 $H_{m_1} - H_2$ 、 $H_{m_2} - H_2$ 、 $H_{m_2} - H_s$ ——自堤线向外算起,第二、三、四、五区段的作用水头。

H_{m_1} 和 H_{m_2} 用下式计算:

$$H_{m_1} = H_1 + (H_B - H_1) \frac{\phi' \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) - \phi' \left(\frac{a_1}{2} \right)}{\phi \left(\frac{b_1 - d_1}{2} \right)} \quad (26)$$

$$H_{m_2} = H_2 + (H_B - H_1) \frac{\phi'' \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - \phi'' \left(\frac{a_2}{2} \right)}{\phi \left(\frac{b_1 - d_1}{2} \right)} \quad (27)$$

其中 a_1 和 a_2 待定。

解联立方程(8)、(9),得到计算两个对称分流点距离 a_1 和 a_2 的公式:

$$a_1 = \frac{4T}{\pi} \operatorname{Arch} \sqrt{M - \sqrt{M^2 - N(G_1 + G_2 - 1)}} \quad (28)$$

$$a_2 = \frac{4T}{\pi} \operatorname{Arch} \sqrt{M + \sqrt{M^2 - N(G_1 + G_2 - 1)}} \quad (29)$$

其中

$$M = \frac{1}{2} \left(G_1 \operatorname{ch}^2 \frac{\pi b_1}{4T} + G_2 \operatorname{ch}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right) \quad (30)$$

$$N = \operatorname{ch}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \operatorname{ch}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \quad (31)$$

$$G_1 = 1 + \Delta_1 \left(\operatorname{th}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right) \sqrt{1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_1}{4T} \right)} \quad (32)$$

$$G_2 = 1 + \Delta_2 \left(\operatorname{th}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right) \sqrt{1 - \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi B}{4T} / \operatorname{sh}^2 \frac{\pi b_2}{4T} \right)} \quad (33)$$

由于式(8)、(9)在等号右端都含有未知量 a_1 和 a_2 ,故不能直接用这两式来计算 Δ_1 和 Δ_2 ,须另行推导算式。按水位差的比值 $\bar{H}_{m_1} = \frac{H_{m_1} - H_2}{H_{m_1} - H_1}$ 和 $\bar{H}_{m_2} = \frac{H_{m_2} - H_2}{H_{m_2} - H_s}$,

立出 Δ_1 和 Δ_2 的联立方程,然后求解,得到计算 Δ_1 和 Δ_2 的公式如下:

当 H_1 、 H_2 和 H_s 的水位值各不相同同时,

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \left\{ \left\{ (1 - \bar{H}_{m_1}) \left[F_2 \left(\frac{a_1}{2} \right) - F_2 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] - \left[F_2 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - F_2 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \right\} \left\{ (1 - \bar{H}_{m_2}) \left[f \left(\frac{a_2}{2} \right) - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[f \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} - \left\{ (1 - \bar{H}_{m_1}) \left[f \left(\frac{a_1}{2} \right) - f \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] - \left[f \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - f \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \right\} \left\{ (1 - \bar{H}_{m_2}) \left[F_2' \left(\frac{a_2}{2} \right) - F_2' \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

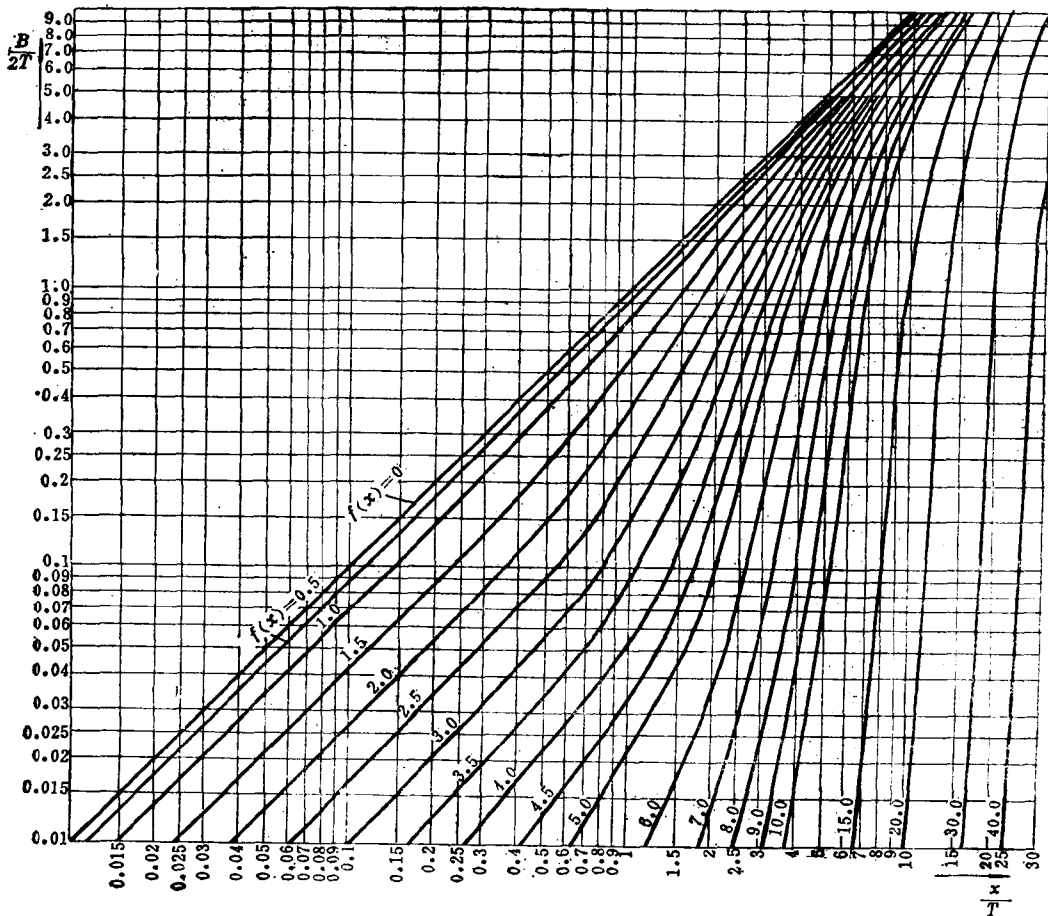
$$\begin{aligned}
& - \left[F'_2 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \left\{ (1-\bar{H}_{m_1}) \left[F'_1 \left(\frac{a_1}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[F'_1 \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \\
& \times \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[F'_2 \left(\frac{a_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[F'_2 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \\
& - \left\{ (1-\bar{H}_{m_1}) \left[F_2 \left(\frac{a_1}{2} \right) - F_2 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[F_2 \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F_2 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[F'_1 \left(\frac{a_2}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[F'_1 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \quad (34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_2 = & \left\{ (1-\bar{H}_m) \left[f \left(\frac{a_1}{2} \right) - f \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[f \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - f \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[F'_1 \left(\frac{a_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right. \\
& \left. - \left[F'_1 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} - \left\{ (1-\bar{H}_{m_1}) \left[F'_1 \left(\frac{a_1}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[F'_1 \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \\
& \times \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[f \left(\frac{a_2}{2} \right) - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[f \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \\
& \div \left\{ (1-\bar{H}_{m_1}) \left[F'_1 \left(\frac{a_1}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[F'_1 \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F'_1 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[F'_2 \left(\frac{a_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right. \\
& \left. - \left[F'_2 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} - \left\{ (1-\bar{H}_{m_1}) \left[F_2 \left(\frac{a_1}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F_2 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] - \left[F_2 \left(\frac{b_2-d_2}{2} \right) - F_2 \left(\frac{b_1+d_1}{2} \right) \right] \right\} \\
& \times \left\{ (1-\bar{H}_{m_2}) \left[F'_1 \left(\frac{a_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[F'_1 \left(\frac{b_2+d_2}{2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \quad (35)
\end{aligned}$$

式(34)、(35)的结构形式及其使用, 十分冗长繁琐, 必须与式(26)~(33), 以及前面有关公式联立计算, 求解 a_1 、 a_2 、 H_{m_1} 和 H_{m_2} , 而且需要逐次逼近, 在实际当中应用困难。通常, 对于一般情况, 可将截渗沟中的水位 H_1 、 H_2 , 控制到接近原始地下水位 H_3 。此时, 有 $\bar{H}_{m_1} \approx \bar{H}_{m_2} \approx 1$ 的条件。于是, 式(34)、(35)得到简化:

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \left\{ \left[F_2 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - F_2 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \left[f \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right. \\ & - \left[f \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - f \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \left[F'_2 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) \right. \\ & \left. \left. - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \div \left\{ \left[F'_1 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \right. \\ & \times \left[F'_2 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[F_2 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - F_2 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \\ & \left. \times \left[F'_1 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & \left\{ \left[f \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - f \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \left[F'_1 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right. \\ & - \left[F'_1 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \left[f \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) \right. \\ & \left. \left. - f \left(\frac{s}{2} \right) \right] \right\} \div \left\{ \left[F'_1 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \right. \end{aligned}$$

图3 函数 $f(x)$ 计算曲线图

$$\begin{aligned} & \times \left[F'_2 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - F'_2 \left(\frac{s}{2} \right) \right] - \left[F_2 \left(\frac{b_2 - d_2}{2} \right) \right. \\ & \left. - F_2 \left(\frac{b_1 + d_1}{2} \right) \right] \left[F'_1 \left(\frac{b_2 + d_2}{2} \right) - F'_1 \left(\frac{s}{2} \right) \right] \} \end{aligned} \quad (37)$$

式(36)、(37)的结构形式及其使用, 比较式(34)、(35)简便得多。与前面有关公式联立计算, 可直接求出 Δ_1 、 Δ_2 , 无须逐次逼近。

当计算出常量 Δ_1 和 Δ_2 之后, 需要用式(28)~(33)算出 a_1 、 a_2 , 然后用式(8)、(9)进行校核, 前后两次得到的 Δ_1 、 Δ_2 , 相对误差不应超过5%。

为了简化运算过程, 方便应用, 我们将函数 $f(x)$ 、 $F(x)$ 和 $F'(x)$, 按变量 $\frac{x}{T}$ 、 $\frac{B}{T}$ 、 $\frac{b}{T}$ 等, 绘制出计算曲线图(见图3、4)。其中 $F(x)$ 和 $F'(x)$, 当 $b=b_1$ 时, 即为 $F_1(x)$

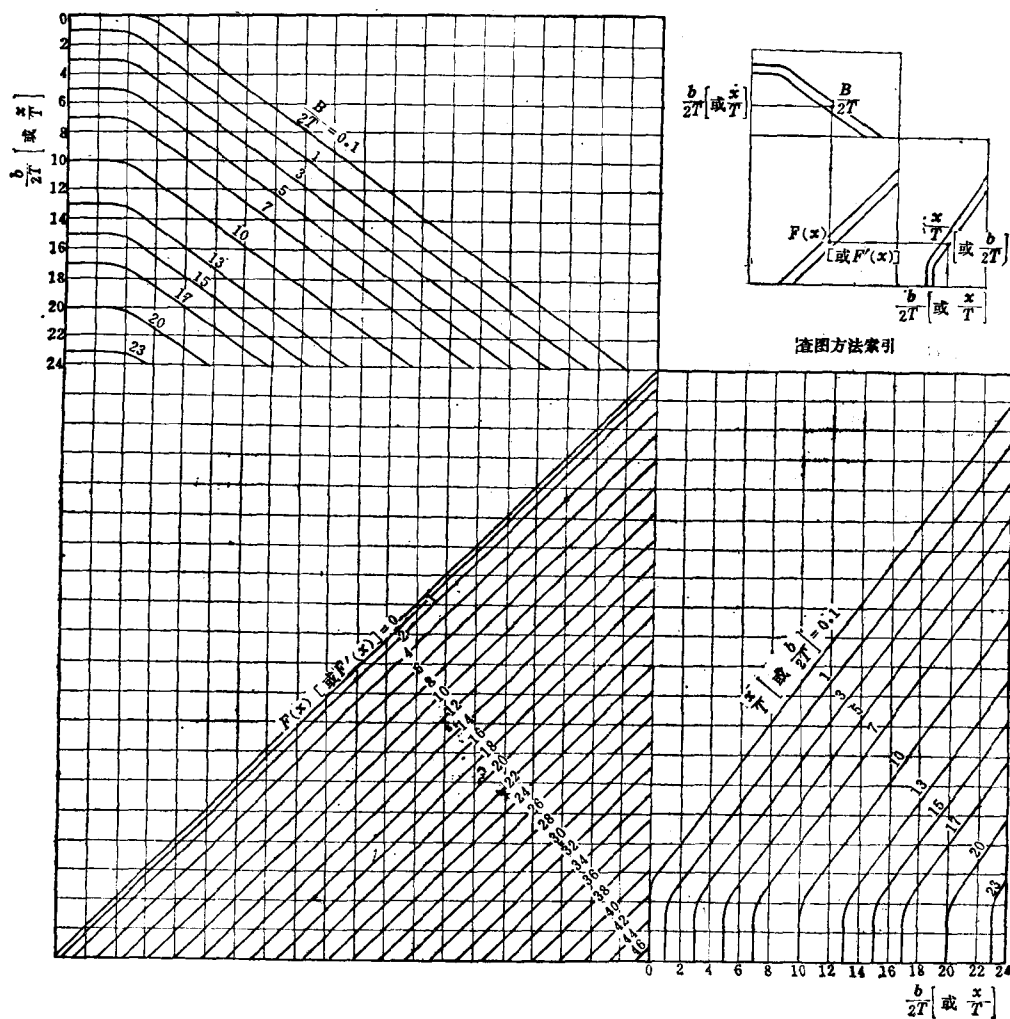


图4 函数 $F(x)$ 或 $F'(x)$ 计算曲线图

和 $F'_1(x)$ 函数; 当 $b=b_2$ 时, 即为 $F_2(x)$ 和 $F'_2(x)$ 函数。

将 $b_2=a_2=s$ 的条件代入式(9), 得 $\Delta_2=0$, 于是, 上述算式适用于单沟截渗排水情况; 再将 $b_1=a_1=s$ 的条件代入式(8), 又得 $\Delta_1=0$, 于是, 上述算式适用于无截渗沟情况。

三、计算举例

按大型输水渠道两侧双沟截渗排水运动图式, 假设已知条件为: $T=200$ 米, $s=2100$ 米, $B=100$ 米, $b_1=300$ 米, $b_2=500$ 米, $d_1=d_2=4$ 米, $H_B=100\%$, $H_1=H_2=H_s=0$, $k=1.0$ 米/天。求渠道的渗漏流量和地下水面线的坐标。计算步骤如下。

(一) 计算函数值

将各已知量 $\frac{B}{2}=50$ 米, $\frac{b_1}{2}=150$ 米, $\frac{b_2}{2}=250$ 米和 $x=\frac{b_1+d_1}{2}=152$ 米, $x=\frac{b_2-d_2}{2}=248$ 米, $x=\frac{b_2+d_2}{2}=252$ 米, $x=\frac{s}{2}=1050$ 米等, 分别按适应的区间范围, 代入式(10)~(14)中, 计算出相应的函数值: $f\left(\frac{b_1+d_1}{2}\right)=1.988$, $F'_1\left(\frac{b_1+d_1}{2}\right)=3.551$, $F_2\left(\frac{b_1+d_1}{2}\right)=2.085$, $f\left(\frac{b_2-d_2}{2}\right)=2.834$, $F'_1\left(\frac{b_2-d_2}{2}\right)=2.064$, $F_2\left(\frac{b_2-d_2}{2}\right)=4.580$, $f\left(\frac{b_2+d_2}{2}\right)=2.867$, $F'_1\left(\frac{b_2+d_2}{2}\right)=2.057$, $F'_2\left(\frac{b_2+d_2}{2}\right)=4.537$, $f\left(\frac{s}{2}\right)=9.106$, $F'_1\left(\frac{s}{2}\right)=1.966$, $F'_2\left(\frac{s}{2}\right)=2.848$ 。

(二) 计算常量并校核

将以上函数值代入式(36)、(37), 计算出 $H_1=H_2=H_s$ 时的常量: $\Delta_1=6.200$, $\Delta_2=3.300$ 。将 Δ_1 、 Δ_2 的第一次计算值和其它有关已知量代入式(28)~(33), 计算出分流点距离: $G_1=5.070$, $G_2=4.025$, $M=34.6$, $N=41.2$, $a_1=376$ 米, $a_2=706$ 米。然后, 将 $\frac{a_1}{2}=188$ 米, $\frac{a_2}{2}=353$ 米, 以及其它有关已知量代入式(8)、(9), 第二次求出常量: $\Delta_1=6.270$, $\Delta_2=3.300$ 。两次计算结果的数值很接近, 相对误差都不超过5%, 表明运算无误。在往后的计算中, 即采用 $\Delta_1=6.300$ 和 $\Delta_2=3.200$ 。

(三) 计算渗流量

将 $x=\frac{b_1-d_1}{2}=148$ 米和其它有关已知量代入式(10)~(12)计算出函数值: $f\left(\frac{b_1-d_1}{2}\right)=1.950$, $F_1\left(\frac{b_1-d_1}{2}\right)=3.584$, $F_2\left(\frac{b_1-d_1}{2}\right)=2.038$ 。然后, 连同 Δ_1 、 Δ_2 代入式(17), 计算出渗流阻抗系数: $\phi\left(\frac{b_1-d_1}{2}\right)=0.936$, 再用式(20), 计算出截渗排水条件下渠道(向两侧)的单长渗漏流量: $Q_B=1.070$ 米²/天。

(四) 计算分流点水位

将 $\frac{a_1}{2}$ 和 $\frac{a_2}{2}$ 数值, 分别按适应的区间范围, 代入式 (10) ~ (14), 计算出相应函数值: $f\left(\frac{a_1}{2}\right)=2.320$, $F_1'\left(\frac{a_1}{2}\right)=2.310$, $F_2\left(\frac{a_1}{2}\right)=2.530$, $f\left(\frac{a_2}{2}\right)=3.680$, $F_1'\left(\frac{a_2}{2}\right)=1.980$, $F_2'\left(\frac{a_2}{2}\right)=2.050$ 。然后, 将函数值分别代入式 (18) 和 (19), 计算出相应的渗流阻抗系数: $\phi'\left(\frac{a_1}{2}\right)=0.760$, $\phi'\left(\frac{b_1+d_1}{2}\right)=0.936$, $\phi''\left(\frac{a_2}{2}\right)=0.778$, $\phi''\left(\frac{b_2+d_2}{2}\right)=0.927$ 。再将阻抗系数值代入式 (26)、(27), 计算出分流点的水位: $H_{m_1}=18.8\%$, $H_{m_2}=15.9\%$ 。

(五) 计算地下水面坐标

将包含有 $x = \frac{b_1-d_1}{2}$ 和 $\frac{s}{2}$ 的函数值代入式 (18)、(19), 计算出相应的渗流阻抗

表 1

x (米)	$\frac{B}{2}=50$	55	60	70	100	130	140	145	$\frac{b_1-d_1}{2}=148$
$f(x)$	0	0.459	0.648	0.900	1.405	1.762	1.868	1.918	1.950
$F_1(x)$	0	0.477	0.676	0.961	1.584	2.296	2.731	3.108	3.584
$F_2(x)$	0	0.454	0.643	0.909	1.428	1.816	1.941	2.000	2.038
$H_x(\%)$ 计算	100	84.00	77.40	68.00	48.30	28.60	18.30	9.80	0
$H_x(\%)$ 电拟	100	84.00	75.00	65.00	48.00	30.00	20.00	10.00	0

x (米)	$\frac{b_1+d_1}{2}=152$	155	160	170	$\frac{a_1}{2}=188$	200	230	240	$\frac{b_2-d_2}{2}=248$
$f(x)$	4.085	4.215	4.470	5.040	6.355	7.540	13.690	20.350	47.200
$F_1'(x)$	0.042	0.098	0.204	0.463	0.994	1.455	3.055	3.790	4.465
$F_2(x)$	4.420	4.150	3.690	2.910	1.830	1.300	0.393	0.178	0.033
$H_x(\%)$ 计算	0	7.4	13.00	17.7	18.8	18.5	13.6	9.6	0
$H_x(\%)$ 电拟	0	10.0	13.00	17.0	18.9	18.6	13.5	9.0	0

x (米)	$\frac{b_2+d_2}{2}=252$	260	270	300	$\frac{a_2}{2}=353$	400	500	700	$\frac{s}{2}=1050$
$f(x)$	2.867	2.937	3.013	3.254	3.680	4.053	4.835	6.410	9.106
$F_1'(x)$	2.075	2.044	2.032	2.005	1.980	1.974	1.967	1.966	1.966
$F_2'(x)$	4.537	3.791	3.486	3.147	2.950	2.894	2.858	2.848	2.848
$H_x(\%)$ 计算	0	7.9	11.20	14.60	15.90	15.50	13.40	8.60	0
$H_x(\%)$ 电拟	0	8.5	12.50	17.00	17.30	17.00	14.00	8.50	0

系数: $\phi'\left(\frac{b_2-d_2}{2}\right)=0.932$, $\phi''\left(\frac{s}{2}\right)=0.930$ 。

选取不同的水平距离 x 值, 代入式 (10) ~ (14), 计算出相应的 $f(x)$ 、 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F'_1(x)$ 和 $F'_2(x)$ 等函数值, 然后连同各已知量, 代入式 (17) ~ (19), 计算出相应的 $\phi(x)$ 、 $\phi'(x)$ 和 $\phi''(x)$, 再分别按适应的范围, 代入式 (21) ~ (25), 计算出不同区间地下水面线的纵坐标值 H_x , 列入表 1。采取 $d_1=d_2=0$ 条件, 使用有关公式, 计算出无沟情况的地下水面线纵坐标 H_x 值, 列入表 2。

表 2

x (米)	$\frac{B}{2}=50$	70	100	150	200	300	500	700	1050
$f(x)$	0	1.000	1.360	1.950	2.560	3.370	4.920	6.380	9.200
$H_x(\%)$ 计算	100	89.8	84.2	77.5	72.4	63.0	46.5	29.7	0
$H_x(\%)$ 电拟	100	88.6	83.0	76.4	70.8	61.6	45.2	29.0	0

四、电 拟 试 验

为了探讨截渗排水措施对渠道和水库附近地下水位的控制作用, 并用试验资料验证理论计算的正确性。我们按各项影响因素, 安排了50个试验组合方案, 进行单因子对比试验。要求通过电拟试验, 得出渗漏流量和地下水面坐标等数据, 为合理布设截渗排水工程, 以及评价其效益, 提供论证和依据。试验对比的因子有 T 、 s 、 B 、 d_1 、 d_2 、 H_1 、 H_2 和 b_1 、 b_2 , 按不同的单项变化数值进行组合。其中双沟截渗排水试验方案36个; 无截渗沟方案14个; 属于渠道截渗排水的44个, 属于水库截渗排水的6个。试验中各项已知数据及其组合方案见表3、5。

试验模型使用导电纸制作, 用电拟渗流仪测试。按测得的等势线增添流线, 绘成流网图(见图5、6)。根据流网图推算出单长渗流量, 其中包括自渠道、水库渗漏的总流量和汇入截渗沟以及绕沟流走的分流量, 列入表4、5。再根据渗流域上边界电位势的分布, 求出地下水面线的纵坐标值(用%表示, 试验结果数值表从略), 并将合流点的水平距与水位值列入表4、5。表中的渗流量均用化引流量表示, 即 $Q_r=Q/K$ 。

电拟模型试验结果表明:

(1) 在渠道和水库附近设置两道截渗排水沟, 控制沟中低水位, 能够起到降低附近地下水位的作用, 与无沟条件比较, 靠近截渗沟两侧, 其降低水位的效果尤为明显。

(2) 地下水位的降低程度虽受各项影响因子的支配, 但各项对比因子中, 以含水层厚度影响最大, 含水层愈薄, 降低愈多; 其次, 截渗沟设置部位的远近, 和沟中水位控制的高低, 都与地下水位降低程度关系密切。截渗沟距渠道或水库愈近, 沟外侧(附近的)地下水位愈高; 沟中水位愈高, 都在很大程度上削弱降低地下水位的效果; 渠道和水库的水面宽度和截渗沟的水下断面大小, 对降低地下水位的程度有一定影响, 但并不强烈; 原

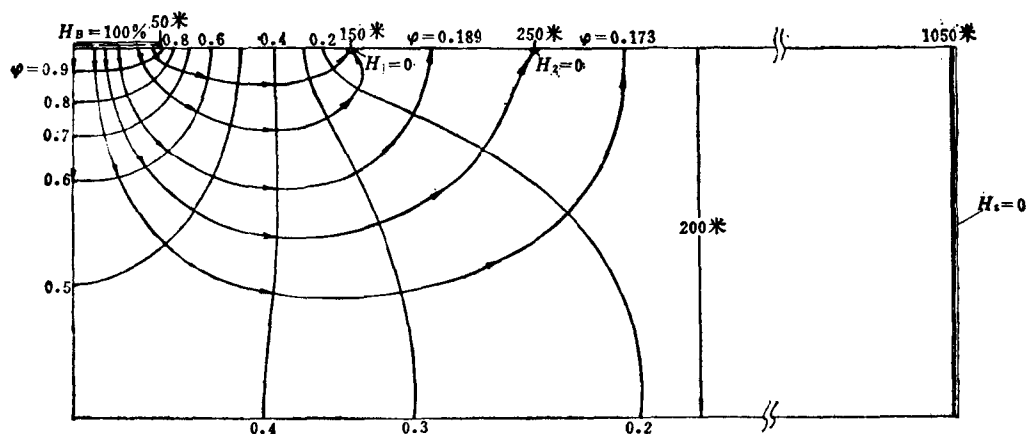


图 5 渠道附近双沟截渗排水流网图 (电拟试验结果)

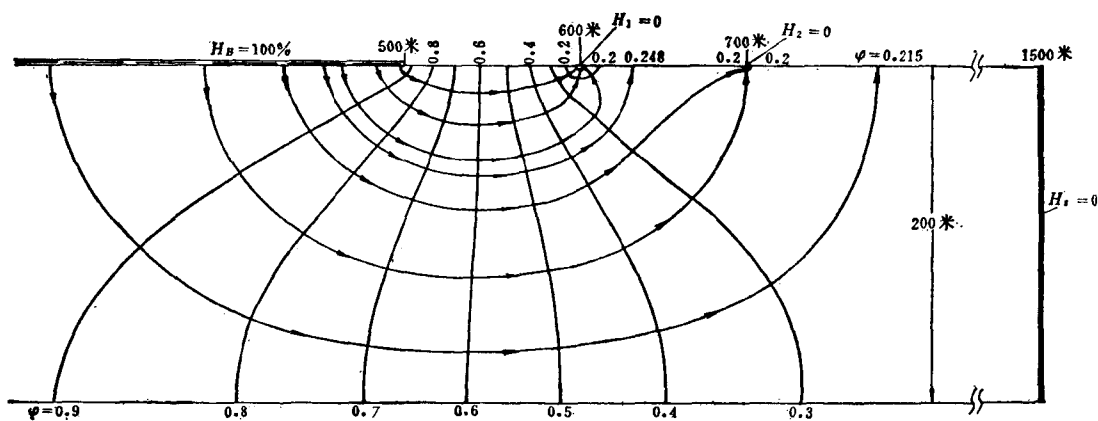


图 6 水库附近双沟截渗排水流网图 (电拟试验结果)

始地下水位出现部位的远近,对截渗沟降低地下水位的作用,影响甚小,特别是两沟之间分流点的水位,始终保持固定的数值,基本上不发生变化。

(3) 自渠道或水库渗漏流量的大小,也受各项影响因素的支配。其影响程度仍然是含水层厚度最大;截渗沟布置位置和沟中水位较明显;渠道和水库的水面宽度以及沟中水下断面大小也有一定影响;而原始水位出现部位的远近,则对渗漏流量的大小不产生什么影响。设置截渗沟与无沟对比,渗漏流量都有不同程度的增加。一般情况下增长率为100%~300%,特殊情况下,如含水层很薄,截渗沟距渠道、水库很近,或沟中水位控制很低等,增长率可达到700~800%。

表 3

试验组合 编 号	对 比 因 子 (米)	试 验 组 合 中 各 已 知 量						
		T (米)	$\frac{s}{2}$ (米)	$\frac{B}{2}$ (米)	d_1 (米)	d_2 (米)	$\frac{b_1}{2}$ (米)	$\frac{b_2}{2}$ (米)
A_1	$T = 500$	500	1050	50	4	4	150	250
$*A_2$	$T = 200$	200	1050	50	4	4	150	250
A_3	$T = 100$	100	1050	50	4	4	150	250
A_4	$T = 50$	50	1050	50	4	4	150	250
A_5	$T = 20$	20	1050	50	4	4	150	250
A_6	$\frac{s}{2} = 2050$	200	2050	50	4	4	150	250
A_7	$\frac{s}{2} = 1550$	200	1550	50	4	4	150	250
A_8	$\frac{s}{2} = 750$	200	750	50	4	4	150	250
A_9	$\frac{s}{2} = 550$	200	550	50	4	4	150	250
$**A_{10}$	$\frac{B}{2} = 500$	200	1500	500	4	4	150	250
A_{11}	$\frac{B}{2} = 200$	200	1200	200	4	4	150	250
A_{12}	$\frac{B}{2} = 100$	200	1100	100	4	4	150	250
A_{13}	$\frac{B}{2} = 20$	200	1020	20	4	4	150	250
A_{14}	$\frac{B}{2} = 10$	200	1010	10	4	4	150	250
A_{15}	$d_1 = d_2 = 2$	200	1050	50	2	2	150	250
A_{16}	$d_1 = 2, d_2 = 4$	200	1050	50	2	4	150	250
A_{17}	$d_1 = 4, d_2 = 2$	200	1050	50	4	2	150	250
A_{18}	$d_1 = d_2 = 10$	200	1050	50	10	10	150	250
A_{19}	$H_1 = H_2 = -33.3\%$	200	1050	50	4	4	150	250
A_{20}	$H_1 = 25\%, H_2 = 0$	200	1050	50	4	4	150	250
A_{21}	$H_1 = 0, H_2 = 25\%$	200	1050	50	4	4	150	250
A_{22}	$H_1 = H_2 = 25\%$	200	1050	50	4	4	150	250
A_{23}	$H_1 = 50\%, H_2 = 25\%$	200	1050	50	4	4	150	250
A_{24}	$\frac{b_1}{2} = 100, \frac{b_2}{2} = 150$	200	1050	50	4	4	100	150
A_{25}	$\frac{b_1}{2} = 100, \frac{b_2}{2} = 250$	200	1050	50	4	4	100	250
A_{26}	$\frac{b_1}{2} = 150, \frac{b_2}{2} = 200$	200	1050	50	4	4	150	200