

文章编号: 0559-9350(2025)02-0205-11

间断式改进暗管排水流量的计算方法

金铭锐¹, 陶园^{1,2}, 王少丽^{1,2}, 管孝艳^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 为应对涝渍灾害频发、耕地资源紧缺的问题, 提出一种排水流量较大、占用耕地较少的间断式改进暗管排水结构。一般常规暗管渗流可以简化为二维计算, 但间断式改进暗管在排水过程中存在柱体砂滤料的三维绕流, 形成相对复杂的空间渗流结构。基于沙金焯的非完整井排水流量公式和常用的暗管排水流量计算公式, 提出地表无积水情况下间断式改进暗管排水流量的简化计算方法, 结合田间试验和 HYDRUS 数值模拟进行验证, 并分析排水过程中各部分流量占比。结果表明, 提出的间断式改进暗管排水流量的理论计算方法合理可行, 间断式改进暗管排水流量的理论计算值与田间试验实测值、模拟值的平均相对误差分别为 6.97% 和 -2.84%; 随排水时间增加柱体砂滤料内部排水流量占总流量比值逐渐下降, 柱体砂滤料外部进水量占总流量比值不断增加; 柱体砂滤料越高, 其内部排水持续时间越长; 柱体砂滤料布设间距越小, 其内部排水与外部进水量之和占总流量比值越大; 间断式改进暗管排水流量计算方法在壤土、粉土中均适用。研究结果可为丰富农田排水理论和暗管工程建设提供思路与参考。

关键词: 间断式改进暗管排水; 柱体砂滤料; 排水流量; HYDRUS

中图分类号: S276.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240222

1 研究背景

近年来我国洪涝灾害频繁, 给农业生产和粮食安全带来巨大挑战^[1-2], 高效地排除田间土壤多余水分是改善农田水热状况、保障粮食安全的重要环节之一。暗管排水技术能有效排除田间多余水分, 且不占耕地, 故得到广泛应用^[3-5], 但因受到土壤渗透系数的影响, 其难以迅速排除田间积水^[6]。基于快速除涝的需求, 陶园等^[6-7]提出了一种连续式改进暗管排水结构, 通过设置连续的强渗水材料作为反滤体, 提高暗管上部土壤的渗水能力, 实现了排水流量的增加, 并基于进水周长相等则排水渗流量相同的假定, 提出了积水条件下连续式改进暗管排水结构的流量计算公式。考虑到连续铺设反滤体可能造成工程成本的增加, 为进一步降低成本, 在连续式改进暗管排水结构基础上, 提出设置非连续反滤体的间断式改进暗管排水结构(以下简称“间断式改进暗排”)。在地表积水情况下, 积水会优先进入反滤体而被快速排除; 在地表无积水的情况下, 垂向柱状反滤体可以有效缩短周围土壤水进入暗管的渗径, 进而提高土体排水性能^[8-9]。连续式暗排流量已证明大于常规暗管排水流量^[7,10], 可以推断间断式改进暗排的流量也大于常规暗管排水流量, 而相较于连续式改进暗排, 间断式改进暗排的反滤体用料更少, 工程成本更低。暗管排水流量计算是暗管工程设计和工程实践的前提, 为更好地评估间断式改进暗排排水效果并促进其推广和应用, 建立表征其排水流量的计算方法是十分必要的。

稳定渗流场中常规暗管排水及连续式改进暗管排水结构的排水过程可视为水流在垂直于暗管的平面二维运动^[11-12]。二维无压排水的稳定渗流状态下, 常规暗管排水流量的常用计算公式有 Hooghoudt 公

收稿日期: 2024-04-20; 网络首发日期: 2024-11-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20241119.1117.003>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 北京市科协青年人才托举工程项目(BYESS2023198)

作者简介: 金铭锐(1998-), 博士生, 主要从事灌溉排工程研究。E-mail: jinmingrui2021@163.com

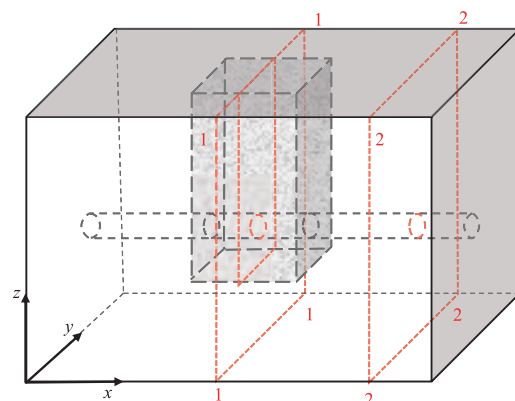
通信作者: 陶园(1988-), 博士, 高级工程师, 主要从事农田排水理论研究。E-mail: taoyuan@iwhr.com

式^[13]、Ernst 公式^[14]等, 二维有压排水时可使用苏联经典公式^[11]或 Kirkham 公式^[15]进行计算。然而对于间断式改进暗排来说, 水流在饱和土壤中进行至间断的反滤体附近会产生绕流^[16], 从而引起水动力条件的改变, 形成相对复杂的空间三维渗流, 原有的暗管排水流量计算公式无法有效表征该问题。

本文围绕间断式改进暗排排水流量进行定量化研究, 提出一种降渍过程中间断式改进暗排流量的简化计算方法, 采用田间试验和 HYDRUS 数值模拟试验对提出的公式进行验证, 并讨论该计算方法在不同土壤质地中的适用性, 以期为我国农田排水理论发展和工程建设提供借鉴和参考。

2 间断式改进暗排及排水渗流特性

2.1 间断式改进暗排简介 间断式改进暗排由常规暗管和长方体或圆柱体砂石反滤料(以下简称柱体砂滤料)或其它渗透性好的反滤材料等两部分组成, 其中柱体砂滤料沿暗管铺设方向间隔布置, 其底部与暗管下缘相切或略低于暗管下缘, 顶部至地表(图 1)。砂滤料需具有反滤能力, 可采用分层铺设或混合铺设。就透水性而言, 柱体砂滤料的渗透系数远大于田间土壤, 其直通地表的垂向布置结构与涝渍水的重力排除方向一致, 农田涝渍水可通过设置的柱体砂滤料渗流进入管道, 具备迅速除涝降渍的能力, 同时, 柱体砂滤料上部占地面积较小, 其对机械化作业影响很小, 若按照分层铺设砂滤料, 上层细砂对于机械化作业的影响可近似忽略。间断式改进暗排与连续式改进暗排相比, 使用的砂滤料体积更小, 可以有效降低工程建设成本。



注: 数字 1、2 为横截面名称标注。

图 1 间断式改进暗排结构

2.2 间断式改进暗排渗流特性 考虑到田面积水的情况下, 地表水会优先通过直通到地表的砂滤料排除, 难以准确表征间断式改进暗排的流量问题, 因此本文仅对地表无积水的降渍过程进行间断式改进暗排渗流特性分析。在初始地下水位与地表齐平的情况下, 间断式改进暗排降渍过程的渗流特性如下: 排水初始, 由于柱体砂滤料的渗透系数较大, 柱体内水位下降较快, 与周边土壤形成水头差, 产生侧向渗流, 周围土壤水分流向柱体砂滤料, 在其影响范围内形成漏斗状的水头下降区^[17]。排水过程中, 柱体砂滤料周围水头降深先增大后减小, 进入柱体砂滤料的土壤水分不断变化, 在柱体砂滤料影响范围外, 土壤水分将通过渗流直接进入暗管。为更清晰地表达各部分流量, 将上述过程中柱体砂滤料自身水位降落而形成的排水, 称为柱体砂滤料内部排水; 柱体砂滤料影响范围内周边土壤水分进入柱体砂滤料而形成的排水, 称为柱体砂滤料外部进水; 柱体砂滤料影响以外的排水视为常规暗管排水。下面就这 3 部分排水组成的渗流特性开展进一步分析。

2.2.1 柱体砂滤料内部排水 由于柱体砂滤料渗透系数远大于土壤渗透系数, 排水时柱体砂滤料优先开始排水, 柱体砂滤料内部水流不会流出到土壤, 其自身成为一个独立的渗流域, 可将柱体砂滤料内部排水等效为二维水流运动的子渗流区域, 该段暗管在子渗流区域中具有独立排水作用。由于柱体砂滤料渗透系数较大, 排水前期不形成悬挂水头, 排水中期地下水位不断下降, 排水后期地下水位最高处高于暗管中心 10~20 cm 时排水缓慢直至排水停止(图 2)。

2.2.2 柱体砂滤料外部进水 间断式改进暗排中柱体砂滤料外部进水过程与土壤水渗流进入井的过程相似, 柱体砂滤料附近土壤水分同时受到垂向重力作用和水平面上的径向流作用, 水流自渗流场中高水头处向柱体砂滤料汇集。对于长方体砂滤料来说, 可根据进水周边长度相等则排水渗流量相同的原理^[6], 将长、宽分别为 a 、 b 的长方体砂滤料外部进水转化为等效半径 r_0 下柱体高度 S 不变的圆柱体砂滤料进水(图 3)。

图 4 给出了图 1 中 1-1 剖面不同时期地下水降落面的变化情况, 排水初期, 柱体砂滤料周围出现水位降深并形成降水漏斗, 水位降深 S_w 为柱体砂滤料影响范围外的地下水位同地下水位与柱体砂滤料

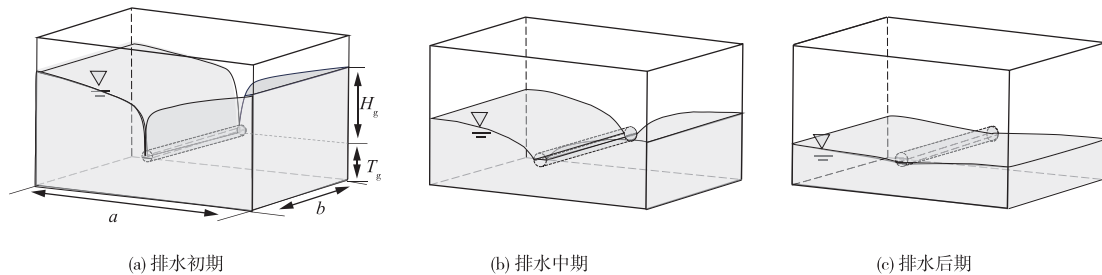


图2 柱体砂滤料内部渗流区域的地下水位变化过程

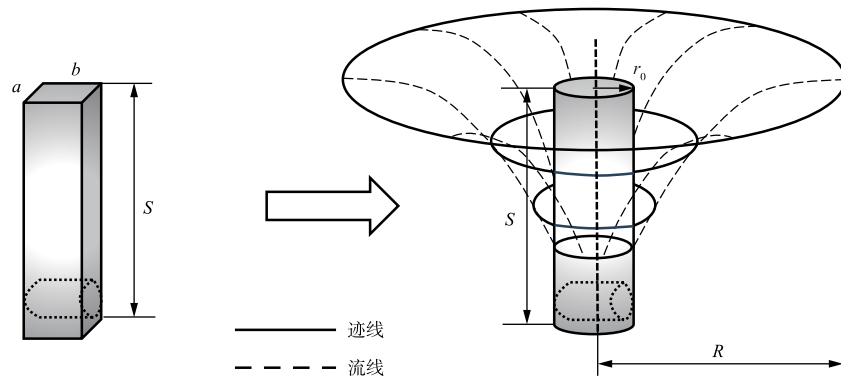


图3 柱体砂滤料的等效转化

交点之间的垂向距离，即柱体砂滤料外部进水过程中的作用水头，当降水漏斗边缘的地下水位趋近于水平，即水位降深为 0 处，漏斗边缘与柱体砂滤料中心的水平距离为柱体砂滤料的影响半径 $R^{[17]}$ ，在柱体砂滤料的影响半径内，等势线为自上向下排列且半径递减的同心圆，流线与等势线垂直，呈弯曲状汇入柱体砂滤料中(图 3)；排水中期，由于柱体砂滤料周边水位降深的变化，柱体砂滤料内水深 l (地下水位与柱体砂滤料交到到滤料底部的距离)逐渐减小，降水漏斗与影响半径不断发展变化，一直处于非稳定状态^[18]；排水后期，柱体砂滤料周边水位降深减小，当计算得出的影响半径 R 小于等效半径 r_0 后，认为柱体砂滤料外部进水停止。

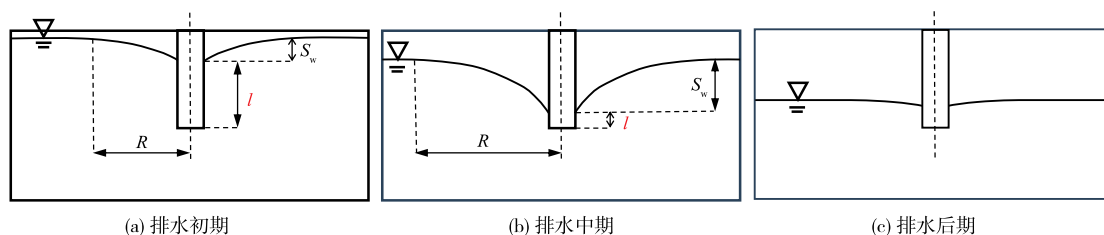


图4 1-1 剖面地下水位变化

2.2.3 常规暗管排水 在柱体砂滤料影响范围以外的区域，地下水的流动视为简单的二维流动。以图 1 中 2-2 剖面的地下水位变化情况为例，排水前期通常会在暗管上部形成悬挂水头^[19-20]，此时暗管中为满管流；排水中期悬挂水头逐渐减小，悬挂水头消失后，暗管中为半管流；排水后期地下水位最高处高于暗管中心 10~20 cm 时排水缓慢直至排水停止(图 5)。

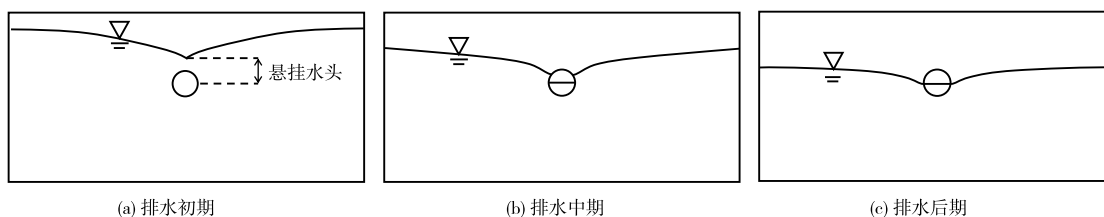


图5 2-2 剖面地下水位变化

3 间断式改进暗排排水流量计算公式推导

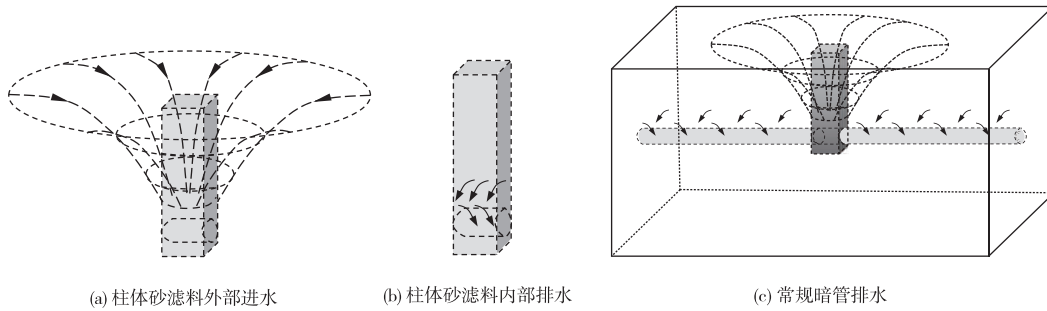
3.1 基本假定 基于间断式改进暗排的渗流特性，做出以下假设：

- (1) 土壤、柱体砂滤料均质且各向同性，排水过程中暗管不发生淤堵；
- (2) 在柱体砂滤料的影响半径范围内不受常规暗管排水影响，降水漏斗形状规则；
- (3) 地下水的渗流服从达西定律，且不考虑排水过程中土壤的固结；
- (4) 渗流过程中柱体砂滤料满足进水周边相等排水流量相同的假定^[6,11]；
- (5) 忽略柱体砂滤料造成的渗径增加问题。

3.2 排水流量组成 间断式改进暗排排水流量分为柱体砂滤料的外部进水、柱体砂滤料的内部排水以及常规暗管排水三个部分，详见图 6，间断式改进暗排排水流量计算如下：

$$Q_{\text{总}} = Q_w + Q_s + Q_c \quad (1)$$

式中： $Q_{\text{总}}$ 为间断式改进暗排排水流量， m^3/h ； Q_w 为柱体砂滤料的外部进水流量， m^3/h ； Q_s 为柱体砂滤料内部排水流量， m^3/h ； Q_c 为常规暗管排水流量， m^3/h 。



注：图中——→方向为水流方向

图 6 间断式改进暗排流量组成示意

3.2.1 柱体砂滤料内部排水流量计算 将柱体砂滤料看作二维渗流场，砂滤料渗透系数较大，暗管上部不会形成悬挂水头。有研究表明当流体雷诺数在 1~10 范围内时，其在多孔介质中流动的过程符合达西定律^[21-22]，柱体砂滤料中的内部排水流量计算满足 Hooghoudt 公式的推导和使用条件^[23]，在此，如图 2 所示的柱体砂滤料内部单位面积排水流量 q_g 采用 Hooghoudt 公式计算，Hooghoudt 公式及 Ploeg 解计算如下：

$$q_g = \frac{8K_g d_e H_g^2 + 4K_g H_g^2}{a^2} \quad (2)$$

$$d_e = \frac{a}{8 \left[\frac{(a - \sqrt{2}T_g)^2}{8T_g a} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{T_g}{\sqrt{2}r} \right]} \quad (3)$$

式中： q_g 为柱体砂滤料内部排水的单位面积排水流量， m/h ； K_g 为柱体砂滤料渗透系数， m/h ； H_g 为柱体砂滤料内暗管的作用水头， m ； d_e 为等效不透水层深度， m ； T_g 为暗管中心到柱体砂滤料下缘距离， m ； r 为暗管半径， m ； a 为垂直于暗管的砂滤料边长， m 。

柱体砂滤料内部排水的排水面积为柱体砂滤料的上表面面积，因此其排水流量的表达式为：

$$Q_s = q_g \times a \times b \quad (4)$$

式中 b 为平行于暗管的砂滤料边长， m 。

3.2.2 柱体砂滤料外部进水流量计算 暗管及柱体砂滤料处于潜水含水层，且滤料并未贯通整个潜水层，根据井的分类可以将其视为潜水含水层中的不完整井^[16]。相较于完整井来说，渗流行进至不完整井附近时，流线急剧弯曲导致附加阻力的产生，沙金焯^[24]将非完整井所在渗流场分为上下两部分，通

过加权平均流线长度的概念来模拟非完整井的局部阻力,得到了非完整井流量计算公式。柱体砂滤料的外部进水流量参考非完整井的流量计算公式,计算如下^[24]:

$$Q_w = K_s \pi S_w \left(\frac{S}{\ln \frac{R}{r_0}} + \frac{2T_0 + l}{\ln \frac{R}{r_0} + f_0} \right) \quad (5)$$

$$f_0 = \frac{2T_0}{l} \ln \left[1 + \frac{T_0}{r_0} \frac{l}{2T_0 + l} \right] \quad (6)$$

式中: K_s 为土壤渗透系数, m/h; S_w 为柱体砂滤料周围水位降深, m; S 为柱体砂滤料高度, m; T_0 为柱体砂滤料底部至隔水层距离, m; l 为柱体砂滤料中水深, 即地下水位与柱体砂滤料交点到滤料底部的距离, m; R 为柱体砂滤料的影响半径, m; r_0 为柱体砂滤料等效半径, $r_0 = (a+b)/\pi$, m; f_0 为非完整井的附加阻力。

柱体砂滤料的影响半径与土壤渗透系数及其周边水位降深有关, 仍参照井的计算公式, 采用 Kusakin 经验公式进行计算^[18]:

$$R = \frac{115}{12} S_w \sqrt{NK_s} \quad (7)$$

式中 N 为饱和含水层的初始厚度, m。

3.2.3 常规暗管流量计算 针对常规暗管的流量计算, 采用 Hooghoudt-Ploeg-B.И.阿拉文公式计算流量^[20], 当悬挂水头为 0 时, B.И.阿拉文公式计算的排水流量也为 0, 相当于仅考虑 Hooghoudt-Ploeg 公式。该区域排水流量公式计算如下:

$$q_c = \frac{8K_s d_c (H_1 - H_2) + 4K_s (H_1 - H_2)^2}{L^2} + \frac{K_s H_2}{\Phi L} \quad (8)$$

$$\Phi = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\sin \frac{\pi(d-r)}{2(T'+d)}}{\sin \frac{\pi d}{2(T'+d)}} & \frac{L}{T'+d} \geq 2 \\ \frac{1}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\tanh \frac{\pi(d-r)}{L}}{\tanh \frac{\pi d}{L}} & \frac{L}{T'+d} \leq 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: q_c 为常规暗管单位面积排水流量, m/h; L 为暗管间距, m; H_1 为暗管中部作用水头, m; H_2 为悬帷段高度, m; Φ 为渗流阻抗系数; d 为暗管埋深, m; T' 为暗管中心到不透水层的距离, m。

根据假定(5)及式(7)的计算结果, 为简便计算, 将整体渗流区域表面积与柱体砂滤料影响面积之差作为常规暗管的排水面积, 常规暗管排水流量计算方法如下:

$$Q_c = q_c \times (L \times W - \pi R^2) \quad (10)$$

式中 W 为暗管长度, m。

4 间断式改进暗排排水流量计算公式验证方法

4.1 田间试验设置 田间试验在安徽省亳州市利辛县城北镇典型试验区进行。试验区内铺设间断式改进暗排 3 处, 暗管长度为 30 m, 管径为 90 mm, 暗管平均埋深 80 cm。为防止暗管进水孔被土颗粒堵塞, 在暗管外包裹土工布。间断式改进暗排小区柱体砂滤料垂直暗管方向宽度 180 cm, 平行暗管方向长度 130 cm, 高度 100 cm, 30 m 暗管中间设置 1 个柱体砂滤料。暗管出水口装有水表和控制阀。为观测试验田动态地下水位变化, 在田块中布设了地下水位观测井, 装有 HOBO 水位记录仪连续记录地下水位。

排水试验主要为单次排水和连续排水两种形式，试验开始前暗管阀门关闭，地下水位线水平，观测期间开启暗管控制阀，暗管进行自由排水，测量过程中无灌溉或降雨。2020 年 7 月 15 日开始单次排水观测，记为 T1 试验，观测时间截止到暗管出流后 429 min；2020 年 7 月 23 日进行连续排水试验，记为 T2 试验，观测时间截止到暗管出流后 1669 min，暗管排水量取 3 根暗管排水量的平均值。T1、T2 试验的初始地下水埋深分别为 0.48 和 0.20 m。排水前在试验区内不同位置取土，通过环刀法测得土壤容重为 1.45 g/cm³，测得饱和含水量和残余含水量分别为 0.44 和 0.05 cm³/cm³，采用双环试验进行原位土渗透系数测量，试验区土壤平均渗透系数为 0.82 m/d。

4.2 模型模拟设置与率定验证

4.2.1 数值模型设置 基于田间试验构建 HYDRUS 模型，采用 VG 模型描述土壤水力特征参数^[25]，模型上边界设定为大气边界，下边界及侧边界为零通量边界，暗管为渗流边界(图 7)。模型中所需的土壤渗透系数 K_s 、饱和含水率 θ_s 及残余含水率 θ_r 通过室内试验测得，VG 模型的形状参数 n 及经验参数 α 的确定则通过率定验证得到。将试验 T1 作为率定期，试验 T2 作为验证期，基于室内试验测量结果，通过率定验证得到土壤水力特征参数。验证公式合理性的工况中设置 3 个模拟方案，分别记为 S1—S3(见表 1)，模型初始条件都为饱和土壤，柱体砂滤料均设置于暗管中间。在间断式改进暗排控制范围边缘(C-C′)、柱体砂滤料边缘(G-G′)、暗管正上方(I-I′)设置观测线，分别用以测量暗管控制范围的地下水位、地下水在柱体砂滤料中降深、暗管正上方悬挂水头及作用水头的变化。

表 1 模型尺寸设置 单位：m

方案	暗管埋深 d	暗管间距 L	暗管长度 W	柱体砂滤料设置		
				平行暗管长度 b	垂直暗管长度 a	高度 S
S1	0.8	20	30	1	1	1
S2	1.2	20	30	1	1	1.5
S3	1.2	20	15	1	1	1.5

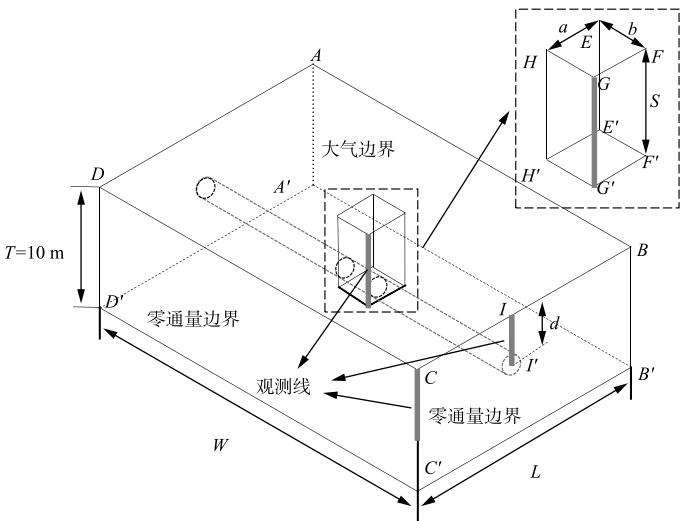


图 7 HYDRUS 模型示意图

4.2.2 模型率定验证 率定验证得到土壤及滤料的水力特征参数见表 2。以率定期 T1 和验证期 T2 的两组试验累积排水量作为特征值验证数值模型的有效性，利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和绝对平均误差(MAE)作为模型的评价指标进行水分运移精度评价，其中 R^2 越接近 1、RMSE 和 MAE 越接近 0，表明模型的模拟精度越高^[26]。各指标计算方法见文献[27]。

图 8 给出了暗管累积排水量实测值与模拟值的对比图，由图中可以看出，模拟数据与实测数据的变化趋势一致性较高。率定期模拟值与实测值的 R^2 为 0.99，RMSE 与 MAE 均在 0.22 m³ 以下；验证期

R^2 为 0.88, $RMSE$ 为 0.63 m^3 , MAE 为 0.52 m^3 , $RMSE$ 与 MAE 均占实测累积排水量平均值的 8.0% 以内, 表明模拟值与实测值的吻合情况较好。综上可知, 模型的累积排水量模拟值与实测值较为接近, 说明使用该率定验证参数进行后续数值模拟试验是可行的。

表 2 率定后的土壤及滤料的水力参数

	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	l
土壤	0.05	0.44	0.018	1.49	3.42	0.5
滤料	0.01	0.42	0.028	2.00	70.00	0.5

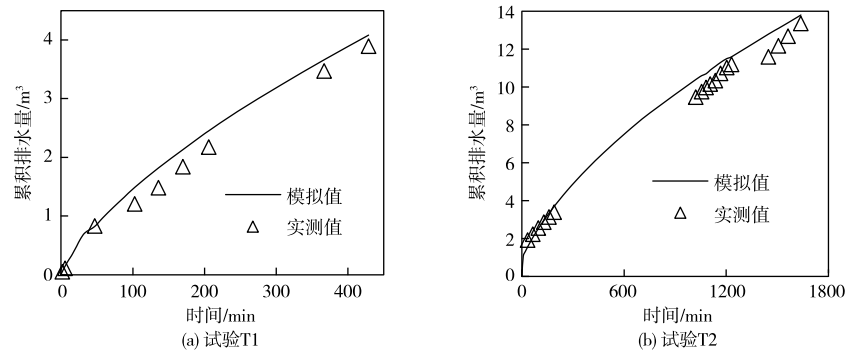


图 8 暗管累积排水量模拟值与实测值对比

5 间断式改进暗排排水流量计算公式验证结果分析

5.1 田间试验结果与理论计算值的对比分析 选取试验 T1 和 T2 的结果与计算值进行对比。对比过程中采用间断式改进暗排的瞬时流量, 由于每分钟流量较小, 为便于计算, 在此换算单位为 m^3/h 。试验实测值与理论值对比结果见表 3。

表 3 实测和计算的间断式改进暗排排水流量对比

试验	开始排水后观测时间/min	地下水埋深/m	流量实测值/ (m^3/h)	流量计算值/ (m^3/h)	相对误差/%
T1	2	0.476	1.350	1.171	-13.25
	60	0.493	0.417	0.414	-0.72
	120	0.248	0.604	0.647	7.11
	150	0.258	0.585	0.619	5.90
T2	840	0.343	0.438	0.479	9.23
	1080	0.367	0.490	0.448	-8.59
	1110	0.370	0.463	0.445	-4.01

由表 3 可知, 采用沙金焯的非完整井排水流量计算公式结合 Hooghoudt 公式和 B.И.阿拉文公式所得的间断式改进暗排排水流量计算值与田间试验实测值吻合较好, 相对误差的绝对值平均为 6.97%, 除试验 T1 在排水 2 min 时的流量实测值与计算值的相对误差大于-10%, 其余排水时间的实测值与计算值的相对误差绝对值均在 10% 以内, 认为本文理论计算值与实测值较为接近, 计算结果可以接受。

5.2 数值模拟结果与理论计算值的对比分析 为进一步验证流量计算公式的准确性, 使用田间试验率定验证所得的土壤水力特征参数通过 HYDRUS 进行数值模拟, 设定初始条件为饱和土壤。对间断式改进暗排流量模拟值与理论计算值进行对比分析。

图 9 为暗管排水流量计算值与模拟值的对比图, 由图可以看出, 间断式改进暗排的流量理论计算值与模拟值随时间变化的趋势基本一致, S1—S3 方案下理论计算值与模拟值的平均相对误差分别为

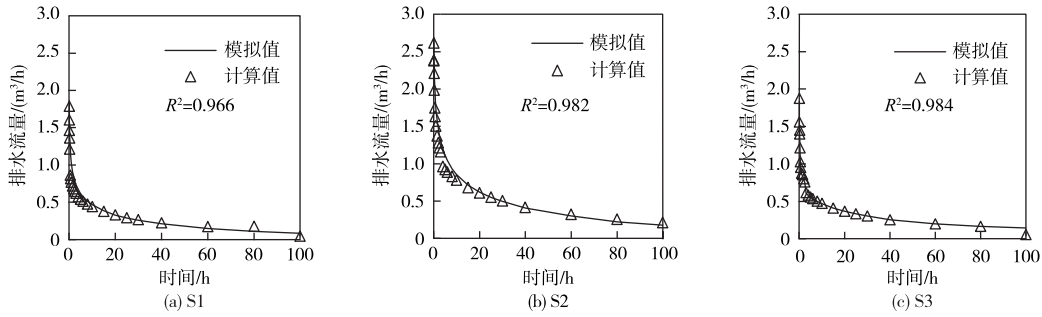


图9 排水流量计算值与模拟值对比

-8.31%、-5.12%和4.91%；三组方案的模拟值与计算值的 R^2 均大于 0.96，计算精度满足要求，表明将间断式改进暗排流量转化为柱体砂滤料的外部进水量、柱体砂滤料的内部排水流量和常规暗管流量叠加计算的方法是合理可行的。

在计算过程中，相对误差最大值出现在柱体砂滤料外部进水后期，柱体砂滤料周围水头降深逐渐减小的过程中，此时在使用 Kusakin 经验公式计算得出的柱体砂滤料影响半径 R 接近于等效半径 r_0 ，使得 $\ln(R/r_0)$ 趋向于 0，导致式(5)的分母偏小，故计算所得柱体砂滤料外部进水量较实际流量大；随着降深进一步减小，影响半径 R 的计算值小于柱体砂滤料的等效半径 r_0 ，计算过程中认为柱体砂滤料外部进水量值为 0，导致间断式改进暗排的总流量计算值较实际流量小。由此，柱体砂滤料的影响半径 R 是影响间断式改进暗排流量计算公式精确度的关键因素，理论分析及实际工程建设中针对如何减小柱体砂滤料的影响半径计算所引起的流量误差问题还有待进一步探究。

5.3 间断式改进暗排各部分流量占比分析 为探究柱体砂滤料在间断式改进暗排排水过程中对流量的影响变化，对计算所得的柱体砂滤料内部排水流量、柱体砂滤料外部进水量、常规暗管排水流量占总排水流量的比例进行分析。

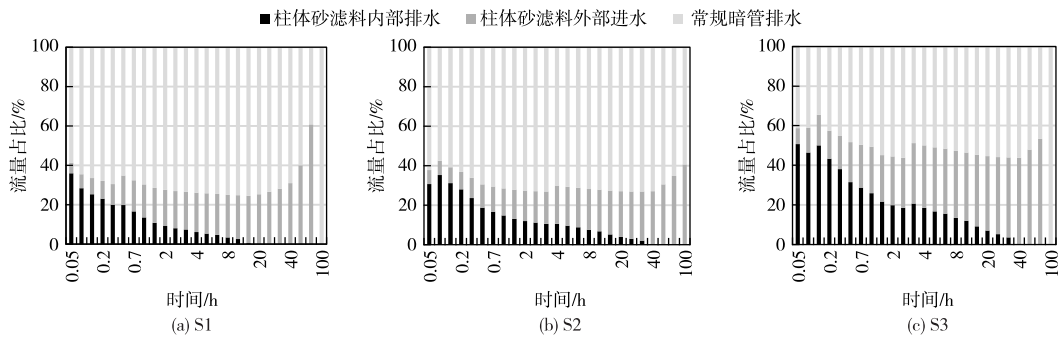


图10 排水过程中各部分流量占总流量比值

图 10 给出了排水过程中柱体砂滤料内部排水流量、柱体砂滤料外部进水量以及常规暗管排水流量占总流量的比值。由图中可以看出，随着时间的增加，柱体砂滤料内部排水流量的占比总体呈现逐渐减小的趋势，柱体砂滤料的外部进水量占比逐渐增加；柱体砂滤料高度越高，其内部排水持续时间越长，S1 方案下柱体砂滤料内部排水时间持续 15 h，S2 与 S3 方案下柱体砂滤料内部排水时间持续 30 h。对比方案 S2 与 S3 可以发现，柱体砂滤料布设间距越小，其在间断式改进暗排排水流量中影响比例越大，S2 中柱体砂滤料外部进水与内部排水流量之和平均占总排水流量的 30.94%，S3 中柱体砂滤料外部进水与内部排水流量之和平均占总排水流量的 47.83%。在 S1、S2 和 S3 方案的流量计算中，常规暗管排水流量 Q_c 分别平均占总流量 $Q_{\text{总}}$ 的 70.26%、69.06% 和 52.17%，但常规暗管排水面积 $(W \times L - \pi R^2)$ 分别占总排水面积 $(W \times L)$ 的 95.14%、91.42% 和 83.01%，说明相同排水面积条件下无柱体砂滤料的常规暗排相较于在暗管上布设柱体砂滤料而形成的间断式改进暗排的排水流量更小。

5.4 土壤质地对计算公式准确性的影响 土壤质地对暗管排水流量影响较大^[28]，为进一步验证间断式改进暗排流量计算公式的适用性，除上述已验证的壤土外，选取粉土和黏土进行深入模拟，其土壤

水力特征参数选用 HYDRUS 模型中给定的经验参数^[29-30]。柱体砂滤料的水力特征参数及模型的初始条件、边界条件和网格划分与上文所述相同,模拟过程中在 0~1、1~10、10~100 h 各选取 9 个点位记录间断式改进暗排的流量。

图 11 为粉土质地下的间断式改进暗排流量计算值与模拟值对比图,其中间断式改进暗排的流量随时间增加而逐渐减小,计算值与模拟值的变化趋势基本一致,S1、S2 和 S3 方案计算值与模拟值的平均相对误差分别为-10.9%、-7.10%、-6.89%,且粉土中的流量计算值与模拟值的 R^2 均在 0.95 以上,说明该计算方法在粉土中同样适用。由图 12 黏土中的间断式改进暗排流量计算结果对比分析可以看出,虽然 3 组计算值与模拟值的 R^2 均在 0.90 以上,计算值可以较好地反映排水流量的变化趋势,但 S1、S2 和 S3 方案计算值与模拟值的平均相对误差绝对值大于 20%,模拟值普遍大于计算值。有研究表明,Kusakin 经验公式在潜水含水层的砂质土壤中适用性更好^[31],而黏土的渗透系数较小,基于 Kusakin 经验公式计算的影响半径存在偏差,会导致柱体砂滤料外部进水流量误差较大。因此,本文提出的间断式改进暗排计算方法更适用于壤土和粉土。

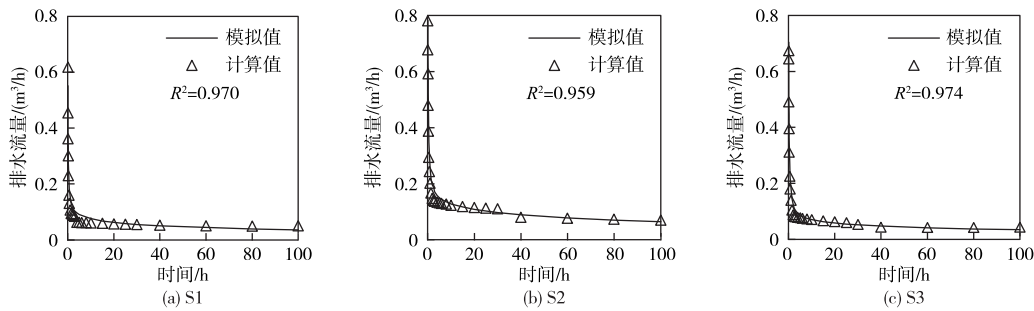


图 11 粉土中间断式改进暗排流量模拟值与计算值对比

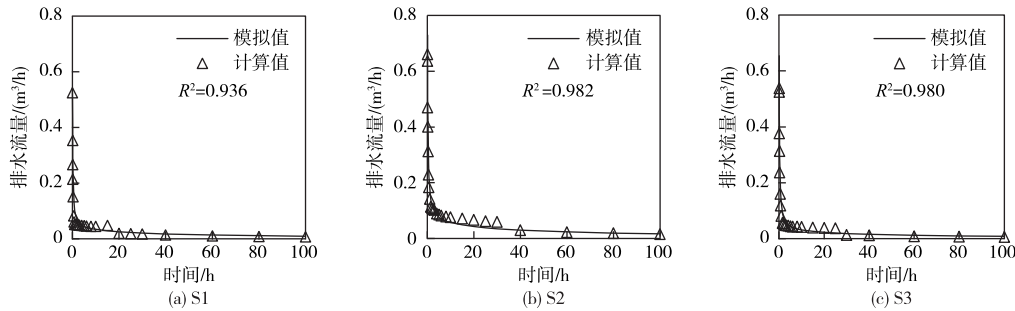


图 12 黏土中间断式改进暗排流量模拟值与计算值对比

6 结论

本文提出了一种较常规暗管排水流量更大的间断式改进暗排结构,分析了其降渍过程中的渗流特征,提出了间断式改进暗排排水流量的计算方法,通过田间试验和 HYDRUS 数值模拟对提出的公式进行了验证,得出以下结论:

(1) 间断式改进暗排的流量计算可简化为柱体砂滤料的外部进水、柱体砂滤料的内部排水以及常规暗管排水三部分流量叠加,分别采用沙金焯非完整井流量公式、Hooghoudt-Ploeg 公式和 Hooghoudt-Ploeg-B.И.阿拉文公式进行计算。在地表无积水的情况下,文中所提公式的计算值与田间试验实测值和 HYDRUS 模拟值的平均相对误差分别为 6.97%和-2.84%,计算值与两种验证方法所得数据吻合良好。

(2) 随着排水时间增加,柱体砂滤料外部进水流量占总流量的比值逐渐增加,柱体砂滤料内部排水流量占总流量比值逐渐减小;柱体砂滤料越高则其内部排水持续时间越长,柱体砂滤料高为 0.8 和 1.5 m 时,其内部排水时间分别持续 15 和 30 h;柱体砂滤料布设间距越小,则其内部排水与外部进水

流量之和占总流量比值越大,柱体砂滤料间距为 30 和 15 m 时,其内部排水与外部进水流量之和分别平均占总排水流量的 30.94% 和 47.83%。

(3) 从不同土壤质地来看,间断式改进暗排流量计算方法在壤土和粉土中平均相对误差分别为 -2.84% 和 -8.30%,在黏土中流量计算值与模拟值平均相对误差绝对值较大,文中提出的计算方法在壤土和粉土土质的流量计算中更为适用。

(4) 地表积水的条件下设置反滤体可以有效提升暗管排水流量^[7,10]。此外,间断式改进暗管排水通过设置直通地表的柱体砂滤料,可为地表积水通过地下排出提供优先排水通道,其在地表积水条件下的排水效果更为明显。地表积水和地表无积水条件下间断式改进暗排流量的影响机制和排水过程有所差别。受试验条件限制,本文仅针对无积水的降渍过程进行研究,后续工作中应考虑地表坡度、反滤体布设参数、暗管参数等多因素作用,分析积水条件下间断式暗管排水流量影响机制和计算方法。此外,对于文中提出的柱体砂滤料的影响半径范围内不受常规暗管排水影响的假定仍需要深入分析其适用的反滤体布设参数。

参 考 文 献:

- [1] 王浩,赵钢铁,田雨,等.考虑时间变化的洪涝灾害损失评估[J].水利学报,2024,55(2):127-136.
- [2] 焦平金,许迪,徐俊增,等.基于排水输泄量模型的农田沟塘组合工程滞涝效应评估[J].水利学报,2020,51(3):358-366.
- [3] 于淑会,刘金铜,刘慧涛,等.暗管控制排水技术在近滨海盐碱地治理中的应用研究[J].灌溉排水学报,2014,33(3):42-46.
- [4] 王少丽,任晓磊,陶园.农田暗管排水能力分析与提升方法探讨[J].水利学报,2021,52(11):1263-1269.
- [5] RITZEMA H P. Drain for gain: managing salinity in irrigated lands—a review[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 18-28.
- [6] 陶园,王少丽,许迪,等.改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):113-118,179.
- [7] 陶园,许迪,王少丽,等.改进暗管排水及其性能研究[J].中国农村水利水电,2016(8):49-51,58.
- [8] 翟云芳.渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2016.
- [9] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(4): 994-1014.
- [10] 任晓磊,王少丽,杨培岭,等.农田不同排水措施地下排水效果模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):253-260.
- [11] 瞿兴业.农田排灌渗流计算及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [12] STUYT L, DIERICKX W, BELTRÁN J M. Materials for Subsurface Land Drainage Systems[M]. Food & Agriculture Org, 2005.
- [13] HOOGHOUTD S B. General Consideration of the Problem of Field Drainage by Parallel Drains, Ditches, Watercourses, and Channels[M]. Groningen: Bodemkundig institute, 1940.
- [14] ERNST L F. Calculations of the steady flow of groundwater in vertical sections[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1956, 4(1): 126-131.
- [15] KIRKHAM D. Flow of ponded water into drain tubes in soil overlying an impervious layer[J]. American Geophysical Union, 1949, 30(3): 369-385.
- [16] 薛禹群,吴吉春.地下水动力学[M].3版.北京:地质出版社,2010.
- [17] 厉立兵,侯兴民,李远东.一种基坑降水影响半径的有限元计算方法[J].岩土力学,2021,42(2):574-580.
- [18] 雅·贝尔.地下水水力学[M].北京:地质出版社,1985.
- [19] 彭佳学.排水暗管悬挂水头的计算方法[J].农田水利与小水电,1990(9):33-35.
- [20] 陶园,李娜,王少丽,等.悬帷段作用下暗管排水流量计算公式探讨[J].农业工程学报,2021,37(22):119-126.

- [21] BEGUIN R, PHILIPPE P, FAURE Y H. Pore-scale flow measurements at the interface between a sandy layer and a model porous medium: Application to statistical modeling of contact erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(1): 1-11.
- [22] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. American Elsevier, 1972.
- [23] JAL V B. Rigorous derivation of Hooghoudt's equation[R]. Roorkee: National Institute of Hydrology, 1998.
- [24] 沙金焯. 不完整井渗流的近似计算[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 36-48.
- [25] 麦叶鹏, 黄国如, 解河海, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 811-822.
- [26] 何建新, 李豪, 杨武, 等. 剪切大变形条件下心墙沥青混凝土渗透特性研究[J]. 水利学报, 2024, 55(6): 686-697.
- [27] 李凯, 任炳昱, 王佳俊, 等. 基于 CEEMDAN-Transformer 的灌浆流量混合预测模型[J]. 水利学报, 2023, 54(7): 806-817.
- [28] 钱颖志, 朱焱, 伍靖伟, 等. 考虑排盐和控盐的干旱区暗管布局参数研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 74-83.
- [29] 侯森, 黄元仿, 沈重阳, 等. 分散流控制壁对无压渗漏计收集效率影响的定量评价[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 198-207.
- [30] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. Water Resources Research, 1988, 24(5): 755-769.
- [31] LIU H B, ZHOU J Q, LI C, et al. Semi-empirical models for predicting stable water inflow and influence radius of a tunnel considering non-Darcian effect[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129574.

A method for calculating drainage flow in intermittent improved subsurface pipes

JIN Mingrui¹, TAO Yuan^{1,2}, WANG Shaoli^{1,2}, GUAN Xiaoyan^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: To address the issues of frequent waterlogging disasters in the field and the scarcity of arable land resources, an intermittent improved subsurface pipe drainage structure was proposed, which offers a larger drainage flow and occupies less farmland. In general, the conventional subsurface pipe can be simplified to two-dimensional calculation, but the intermittent improved subsurface pipe has three-dimensional seepage around the cylinder sand filter in the process of drainage, forming a relative complex spatial seepage structure. By combining the drainage formula of Sha Jinxuan partially penetrating well and the drainage formula of conventional subsurface pipe, a simplified method for calculating intermittent improved subsurface pipe drainage flow in the absence of surface water was given. Field experiments were combined with HYDRUS numerical simulations to verify the results, and the flow proportion of each part in the drainage process was analyzed. The results show that the theoretical calculation method for intermittent improved subsurface pipe flow is reasonable and feasible, and the average relative error between the theoretical calculation and the measured value and the simulated value is 6.97% and -2.84%, respectively. With the increase in drainage time, the proportion of internal drainage flow to total flow in the cylindrical sand filter gradually decreased, while the proportion of external inlet flow to the total flow continuously increased. The higher the cylindrical sand filter material is, the longer the internal drainage duration is, the smaller the spacing of the cylinder sand filter material, the greater the proportion of the sum of internal drainage and external inlet flow to the total flow. The discontinuous improved method for calculating subsurface pipe drainage flow is suitable for both loam and silt. The research results provide ideas and references to enrich the drainage theory of agricultural land and the construction of subsurface pipe projects.

Keywords: intermittent improved subsurface pipe; cylinder sand filter; drainage flow; HYDRUS

(责任编辑:王 婧)