

平原水库“防-截-导”渗流控制 对坝后地下水水位的影响

王琳¹, 毛海涛^{1,2}, 严新军¹, 黄风¹, 林荣³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056002; 3. 巫溪县后溪河水电开发有限公司, 重庆 405800)

摘要: 针对干旱区平原水库渗漏引起的坝后土壤盐渍化问题, 基于非饱和渗流理论, 以恰拉水库坝后农田地下水埋深为研究对象, 采用数值模拟的方法研究了平原水库“防-截-导”渗流控制对坝后地下水埋深的影响。从防渗措施, 截渗沟深度, 截渗沟内积水排导情况等方面对比分析。结果表明: 截渗沟深度与截渗沟积水深度的变化都会影响坝后农田地下水埋深, 截渗沟越深, 沟内积水深度越小对降低下游地下水位越有利。在“截渗-导渗”的联合作用下, 确定无防渗措施、水平铺盖、垂直防渗墙3种工况下联合截渗沟最适深度分别为4.5、4.5、3.5 m。其中垂直防渗结合“截渗-导渗”的作用效果最佳, 是无防渗措施条件下的1.16~1.30倍, 是水平铺盖措施条件下的1.15~1.21倍。可见“防-截-导”的综合控渗机制可有效控制下游的渗流量从而降低坝后农田地下水位, 防止坝后农田土壤盐渍化的发生, 治理下游的生态环境。

关键词: 地下水; 土壤盐渍化; 防渗体; 截渗沟; 导渗

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0254-07

Influence of “prevention – interception – diversion” seepage control method on the groundwater level in the downstream area of a plain reservoir dam

WANG Lin¹, MAO Haitao^{1,2}, YAN Xinjun¹, HUANG Feng¹, LIN Rong³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei Engineering University, Handan

056002, China; 3. Wuxi Houxihe Hydropower Development Co., Ltd., Chongqing 405800, China)

Abstract: To help solve the soil salinization problem of the dam downstream area caused by reservoir leakage in plain arid areas, we studied the buried depth of the farmland underground water level in the downstream area of the Qiala Reservoir dam based on the unsaturated seepage theory, as well as the influence of “prevention – interception – diversion” seepage control method on the buried depth using numerical simulation. The results showed that the change of the depth and the water collecting depth of the interception ditch could affect the groundwater buried depth of the farmland in the downstream area of the dam. Under the combined action of “prevention – interception – diversion”, the optimal depths of the interception ditches were determined to be 4.5 m, 4.5 m and 3.5 m, respectively under the three working conditions of no seepage control measures, horizontal bedding and vertical cut-off wall. Among them, the effect of the vertical cut-off wall combined with “interception – diversion” method performed the best, which was 1.16 – 1.30 times of no seepage control measures, and 1.15 – 1.21 times of horizontal bedding measures. It can be seen that the comprehensive seepage control mechanism of “prevention – interception – diversion” can effectively control the seepage flow in the downstream so as to reduce the farm-

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-10-16

基金项目: 2018–2019年自治区研究生科研创新项目(XJ2019G172); 国家自然科学基金项目(51309262); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjAX0673); 重庆市教委2011协同创新子课题(061500911)

作者简介: 王琳(1995-), 女, 重庆永川人, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤盐渍化及土石坝渗流研究。

通讯作者: 毛海涛(1980-), 男, 山西平陆人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区节水灌溉及土壤次生盐渍化机理研究。

land underground water level, prevent the farmland soil salinization, and control the downstream ecological environment.

Key words: groundwater; soil salinization; impervious body; interception ditch; seepage diversion

1 研究背景

在干旱、半干旱地区的平原灌区,平原水库的渗漏抬升了坝后农田水位,造成土壤次生盐渍化^[1]。在“盐随水走”的作用下,土地次生盐渍化等坝后生态问题将愈演愈重^[2]。因此,减少大坝坝后渗漏量,将地下水位埋深控制在“地下水临界深度”以下,即易盐碱化地区不发生耕作层土壤盐渍化并且作物不受盐害存在的最浅地下水埋藏深度^[3],是治理土壤盐渍化的关键。

由于平原水库坝长且覆盖层深,采用全封闭式垂直防渗体的防渗效果较好,但施工技术要求极高而且修建预算费用高,经济方面难以承受^[4];若采用水平铺盖防渗,虽降低了施工难度与预算费用,但防渗效果不及垂直防渗^[5]。防渗方面主要还是以考虑渗流稳定和大坝安全性为主,仅通过上游防渗体难以实现对下游渗漏量的控制。对此要从控制渗水“源头”方面下手,即在坝后设置截排系统对水库渗漏水进行截流、排导,防止大量渗水流入下游抬升坝后农田地下水位,从而达到治理坝后农田土壤盐渍化的效果^[6]。

近年来,许多国内外学者针对利用截渗、排渗的方法来降低农田地下水位埋深展开了大量的研究。罗纨等^[7]研究表明农田排水沟能有效控制地下水埋深并可以排出淋洗土壤盐碱水,达到维持灌区水盐平衡的目的;李山等^[8]提出田间排水沟沟内存在积水时,会对农田地下水进行反渗补给,但积水反渗并未引起作物根系区出现大量积盐的现象,因此不会对农田地下水含盐量造成影响;潘延鑫等^[9]研究发现排水沟对农田地下水有控制作用,农田地下水位会随着田间相邻排水沟水位的变化而变化,且变化趋势基本一致;Karandish 等^[10]研究表明,截渗沟水位变化可以直接间接地影响周围农田的地下水位和盐分含量。毛海涛等^[11]则提出从水库的防渗体和排渗体相结合的方法出发,从源头上控制坝后的地下水位,使其控制在地下水临界水位以下。但针对干旱区平原水库的水位控制问题,还缺乏系统的分析,许多学者忽略了截渗后积水的有效疏导等问题,并且在联合使用下降低地下水位的效果方面还亟需研究。

因此,本文以内陆干旱地区典型平原水库——

恰拉水库为研究对象,以非饱和土体渗流理论作为理论基础,利用 ABAQUS 有限元软件^[12]进行数值建模计算分析,研究了平原水库“防-截-导”联合渗流控制下对坝后地下水埋深的影响,在保证坝基渗流的安全性和稳定性的前提下,防止坝后农田发生土壤盐渍化。

2 非饱和和渗流理论

对非饱和土体进行渗透系数定义时,需要考虑两个影响渗透系数的主要因素,即孔隙比和饱和度。饱和度通常被表述成基质吸力的函数,采用土壤水分特征曲线(简称 SWCC)来描述非饱和土的基质吸力与含水量之间的关系。

2.1 非饱和土体渗流理论

基质吸力由孔隙水压力和孔隙气压力共同决定,采用 Van Genuchten^[13]非饱和土水特征曲线方程。

$$u_m = u_a - u_w \quad (1)$$

$$\theta_w = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha_w(u_m)^{n_w}]^{m_w}} + \theta_r & (\theta_w < 0) \\ \theta_s & (\theta_w \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_m 、 u_a 、 u_w 分别为基质吸力、孔隙气压力和孔隙水压力, kPa; θ_w 、 θ_s 、 θ_r 分别为土体的体积含水率、饱和状态体积含水率和残余状态体积含水率; α_w 为与进气值倒数相关的参数; n_w 、 m_w 分别为超过进气值后与土壤-水份特征曲线(SWCC)斜率相关的参数和非饱和土残余状态相关的参数, m_w 与 n_w 的关系可表示为:

$$m_w = 1 - \frac{1}{n_w} \quad (3)$$

2.2 体积含水率与饱和度的关系

通过非饱和渗流方程可以得到基质吸力与体积含水率之间的关系,在数值模拟时需要考虑饱和度与基质吸力的影响,因此需要进行体积含水率 θ_w 与饱和度 S_r 之间的关系转换,转换关系式为:

$$S_r = \theta_w \left(1 + \frac{1}{e}\right) = \frac{\theta_w}{n} \quad (4)$$

式中: S_r 为土体饱和度; θ_w 为土壤体积含水率; e 为土壤孔隙比; n 为孔隙率。

2.3 饱和度对渗透性影响

在非饱和和渗流过程中,要考虑土体的饱和度 S_r 对渗透系数 k 的影响,根据饱和度 S_r 的不同取值范

围确定折减系数 k_m 来修正渗透系数 k 。

当饱和度 $S_r < 1.0$ 时, $k_m = (S_r)^3$;

当饱和度 $S_r \geq 1.0$ 时, $k_m = 1.0$ 。

在计算时渗透系数 k 按照饱和度的不同修正为 $k = k_m \cdot k_s$, k_s 为土体的饱和渗透系数。

2.4 饱和度与基质吸力之间的关系

当土体处于非饱和状态, $u_w < 0$, 土体的基质吸力往往用 $-u_w$ 表示。出于对土体吸湿和脱湿特性^[14]的考虑, 应控制土体饱和度在基质吸力的作用下处于某一范围内。因此, 在研究非饱和土问题时, 还需要定义吸湿曲线和脱水曲线并考虑两者间的变化规律。

3 数值模拟

3.1 工程概况

恰拉水库为典型的内陆干旱区平原水库, 位于东经 $86^{\circ}36' \sim 86^{\circ}57'$, 北纬 $40^{\circ}04' \sim 40^{\circ}59'$ 范围内, 坐落在新疆巴音郭楞蒙古自治州尉犁县境内。水库库容为 $1.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工程规模属于大(2)型。水库三面环绕筑黏土均质坝, 建基面高程为 869.0 m, 坝顶高程为 877.3 m, 水库的设计水位为 875.0 m。坝高 8.3 m, 坝顶宽 6.0 m, 上游与下游坝坡均为 1:2.5。坝基以细砂为主, 坝基深度取 100 m。库区气候为极端干旱的大陆性气候, 常年平均气温为 10.6°C , 其中年内极端最高气温达 42.2°C ^[15]。多年的平均降水量与平均蒸发量分别为 21.5、2 680 mm, 由于年平均降水量很小, 建模时不考虑渗流自由面上的降雨入渗。在水库修建之前, 该地区的农田地下水埋深接近 3 m。水库蓄水后, 抬升了地下水位, 水库周边农田出现土壤盐渍化的现象且逐年加剧。

使库区周边农田发生土壤盐渍化的地下水位临界深度^[16]可表示为:

$$H_k = H_z + H_g + H_a \quad (5)$$

式中: H_z 为作物根系层厚度, m, 库区周边生长的农田作物根系层厚度取 0.3 m ^[17]; H_g 为毛管水强烈上升高度, m, 该地区取 1.65 m ; H_a 为安全超高, m, 当地经验取值一般取 0.5 m ^[18]。

由此可知, 当地地下水位临界深度为 $H_k = 0.3 + 1.55 + 0.6 = 2.45 \text{ m}$ 。

3.2 模型建立

3.2.1 工况设置 为了系统研究不同防渗方案下, 坝后截渗沟和导水体系对水位的控制效果, 本研究在防渗方面设置了 3 种工况, 分别为: (1) 无防渗措

施; (2) 土工膜水平铺盖防渗措施, 水平铺盖长度为坝前水头 6 m 的 22 倍, 即 132 m; (3) 悬挂式混凝土垂直防渗墙深度 20 m^[19], 如图 1 所示。

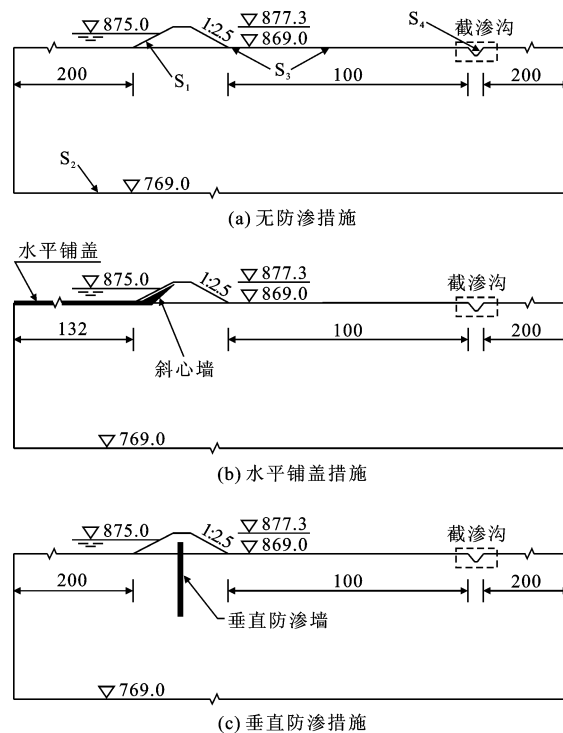


图 1 3 种防渗工况的模型断面图 (单位: m)

截渗沟(又称截水沟)位于坝后距坝址 100 m 处, 深度取 1.5、2.5、3.5、4.5 m 进行对比。为更好地反映截渗沟排水效果(导渗)对地下水位的影响, 截渗沟均设置 5~6 个不同的积水深度作为对比研究。

为便于观察坝后地下水位埋深的变化趋势, 分别在坝后距坝址 20、40、60……200 m 处设置 10 个水位数据采集点, 编号为 P_{20} 、 P_{40} 、 P_{60} …… P_{200} 。

3.2.2 模型边界条件的设定 3 种工况下, 模型整体定义的边界条件(除水平铺盖与垂直防渗墙的边界定义)大致相同, 具体为图 1(a)所示:

(1) S_1 为已知总水头边界条件, 即上游边界条件, 总水头 $\Phi_1 = H_1$ 。在 ABAQUS/Standard 中指定该边界上的孔隙水压力, 其关系式为:

$$u_w = (H_1 - Y)\gamma_w \quad (6)$$

式中: u_w 为孔隙水压力, kPa; H_1 为水头高度, m, 根据水库设计水位取 6 m; Y 为空间分布计算的纵坐标, m; γ_w 为水的容重, kN/m^3 , 取值为 10 kN/m^3 。

(2) S_2 为不透水边界条件, 即边界上通过的流量为零。一般所有边界在软件中初始默认设定为不透水边界, 因此不需要额外定义。

(3) S_3 为自由溢出段边界条件, 即下游边界条件, 在定义该边界条件时需要将孔隙水压力 u_w 定为 0 即

可。其中 S_3 边界条件里坝体的下游坡面与坝后区域又是排水边界,因此要注意在 ABAQUS/Model/Keywords 里定义这两处的初始土体饱和和渗透系数 k_s 。

(4) S_4 为截渗沟的边界条件,其中底部为不透水边界无需定义,沟的左右两侧既有截渗沟的定水头边界又为自由溢出段边界。定水头 $\Phi_2 = H_2$,与孔隙水压力的关系为:

$$u_w = (H_2 - Y)\gamma_w \tag{7}$$

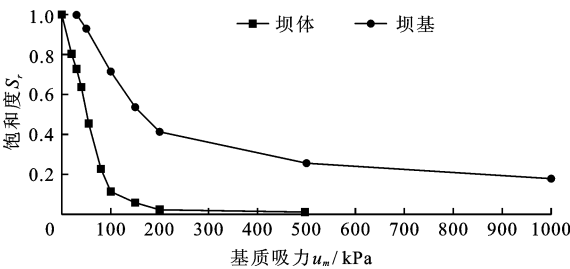
式中: H_2 为沟内的水头,即积水高度, m。

由于该边界也是自由溢出段边界因此初始孔隙水压力 u_w 应为 0,但公式(7) 在定义时刚开始沟内无积水高度,随着时间增加才有积水高度,因此满足初始 u_w 为 0 的条件,公式(7) 成立。

(5) 水平铺盖(包括斜心墙)与垂直防渗墙在定义不透水边界条件时,只需选定材料不对此做渗透分析即可。

3.3 计算参数

采用张力计法^[20]测得坝基土样的土壤水分特征曲线,通过 SWCC 中的参数换算得到对应的饱和度和基质吸力和渗透系数 k_s 的变化曲线。利用 ABAQUS 分析时,非饱和坝体和坝基土体的饱和度选取范围为 0.01 ~ 1,其各参数关系如图 2、3 所示。



坝体、坝基、水平铺盖和垂直防渗墙の数値模拟计算参数见表 1。将饱和度随基质吸力和渗透系数的变化曲线和物理、力学性质指标输入软件并创建计算参数,再根据渗流有限元的计算原理创建初始边界条件。

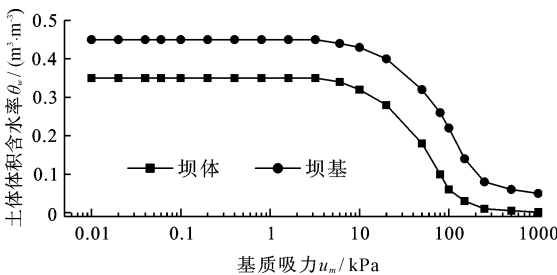


图 2 土体体积含水率随基质吸力的变化关系

4 数值模拟结果与分析

4.1 截渗沟及深度对地下水位的影响

坝后设置截渗沟可以明显降低坝后的地下水位,坝后设置截渗沟坝后水位可降低到地面以下,而无截渗沟时,坝后在 300 m 范围内均有地表积水,如图 4 所示。坝后达到渗流稳定时且沟内水位在短时间内不发生变化,对比各工况下地下水埋深 h_1 随截渗沟深度 H 的变化曲线,如图 5 所示。

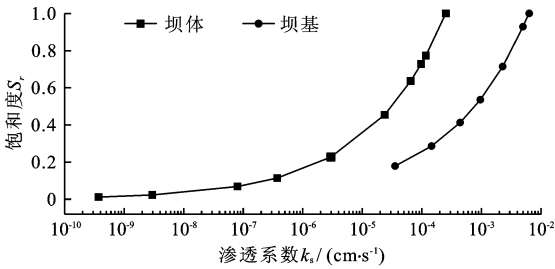


图 3 土体饱和度随基质吸力和渗透系数的变化关系

表 1 数值模拟计算参数

项目	孔隙率/%	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	杨氏模量/MPa	泊松比	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
黏土(坝体)	44.0	2.53×10^{-4}	4.00×10^4	0.35	1.93
细砂(坝基)	28.0	6.26×10^{-3}	2.00×10^4	0.20	2.34
混凝土垂直防渗墙	5.6	7.83×10^{-9}	3.00×10^4	0.20	2.20
土工膜水平铺盖	2.3	1.01×10^{-8}	0.85×10^3	0.38	1.58

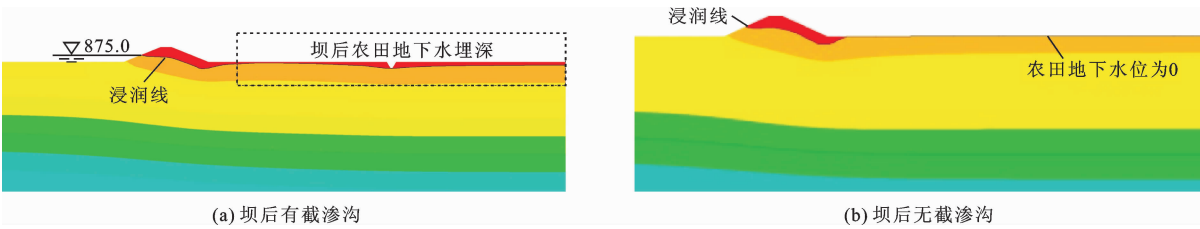


图 4 有无截渗沟坝后地下水位的变化

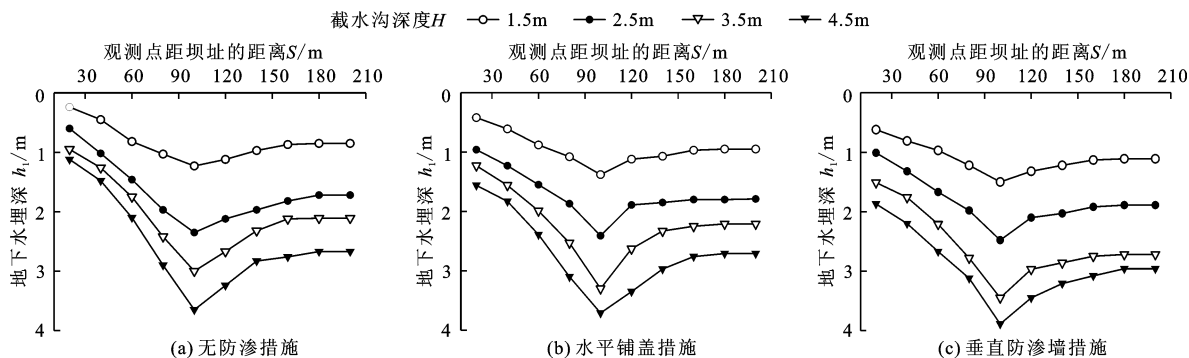


图5 地下水位埋深随截渗沟深度的变化曲线

由图5可得,以无防渗措施为例, $H = 1.5、2.5、3.5、4.5$ m 时, $P_{20} \sim P_{200}$ 的地下水位埋深 h_i 分别为: $0.24 \sim 0.85$ m、 $0.61 \sim 1.72$ m、 $0.95 \sim 2.11$ m、 $1.12 \sim 2.67$ m。可见各工况下坝后农田的地下水位均随截渗沟深度增大而降低,截渗沟越深,降低地下水位效果越好;坝后地下水位以截渗沟为中心,形成降落“漏斗”,截渗沟上游水位略高于下游水位。各工况在坝后 P_{180} 左右均基本趋于稳定, P_{200} 处的地下水位不再发生变化。除此之外还发现,同种工况下截渗沟深度 H 每增加 1.0 m,最终地下水位降低深度会增大 $1.22 \sim 2.02$ 倍。

综合对比不难发现,相同时间内,随着截渗沟深度的增大,无防渗措施下的峰值降落差最明显。截渗沟深度 H 从 1.5 m 增大到 4.5 m 时,无防渗措施、垂直防渗、水平铺盖 3 种工况下的观测点峰值分别降落了 $2.42、2.33、2.35$ m。可见,在无防渗措施情况下,由于渗流量大,截渗沟及其深度变化对坝后水位影响最大。

4.2 防渗形式对坝后地下水位的影响

以截渗沟 $H = 1.5$ m 为例,且沟内积水水位稳定后对比 3 种工况下,坝后地下水位的变化规律如图 6 所示。

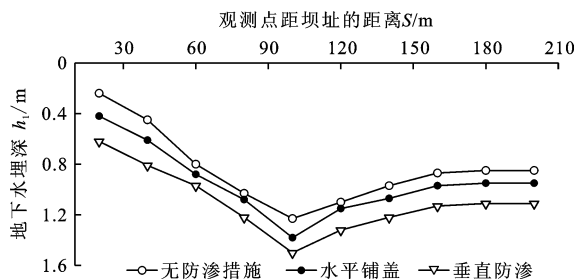


图6 各工况下坝后地下水位变化规律

图6显示,由于垂直防渗在渗流控制方面优于水平铺盖,减小了渗水的总量。因此结合坝后截渗沟后,控制地下水位效果最佳,其次是水平铺盖和无

防渗工况。无防渗措施、水平铺盖、垂直防渗 3 种工况下的观测点峰值分别为 $1.23、1.38、1.49$ m;稳定后 P_{200} 处地下水位埋深 h_i 分别为 $0.85、0.95、1.11$ m。在垂直防渗措施下水位降落峰值均大于其他两种工况,且趋于稳定后的地下水位最低。可见,防渗效果越好,截渗的压力就会越小,截渗沟的深度可以适当减小。

4.3 “导渗”作用对坝后地下水位的影响

坝后截渗沟控制坝后地下水位虽然效果明显,但随着渗水量的增大,截渗沟水位也会逐渐上升,若沟中水体若不能及时排除,对坝后地下水位也会有一定的影响。以 $H = 4.5$ m 时,结合截渗沟效果最佳的垂直防渗措施为例,来分析导渗的作用见图 7。

图 7(a)表明,截渗沟积满后坝后稳定区的地下水位为 0.43 m,降落漏斗区域范围也变小,积满水的截渗沟在控制坝后地下水位的功能基本丧失;图 7(b)表明,将截渗沟内部水体导出并在渗流稳定后,坝后整体地下水位降低,降落漏斗区域对地下水位埋深的影响范围扩大,最终在下游水位稳点区的地下水位降低至 2.96 m,大于当地的“临界水深”。

此外,导渗还具有时效性,并控制在合适的水位,导渗后在不同截渗沟水位下,坝后地下水位的对比如图 8 所示。

图 8 显示,截渗沟 $H = 4.5$ m, P_{100} 处的地下水位维持在 2.88 m 时,坝后渗流稳定后地下水位为 2.46 m(图 8(a))。若能及时排除截渗沟内部的渗漏水,使其 P_{100} 处的地下水位降至 3.89 m,则渗流稳定后 P_{200} 处的地下水位为 2.96 m(图 8(b))。因此“导渗”也是必要的治理坝后土壤盐渍化的重要环节。

4.4 “截渗”与“导渗”联合作用对坝后地下水位的影响

通过改变截渗沟内积水深度,来反映“截渗”“导渗”的过程对地下水的影响,即从截渗沟积水集

满开始,取5~6个逐级减小的积水深度值作对比, 如图9所示。

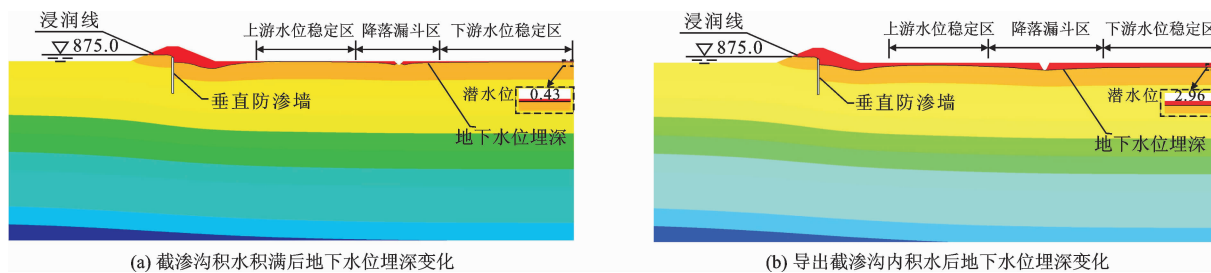


图7 截渗沟积水积满和导出后坝后地下水位的变化(单位:m)

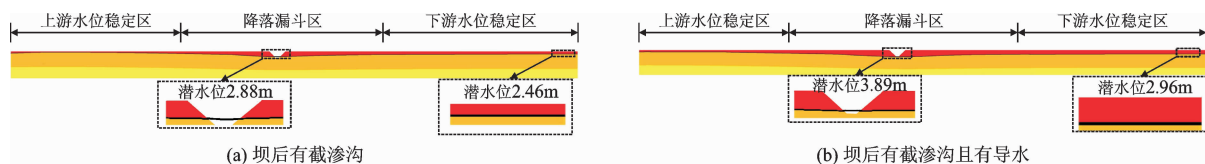


图8 截渗沟内积水变化对坝后水位的影响

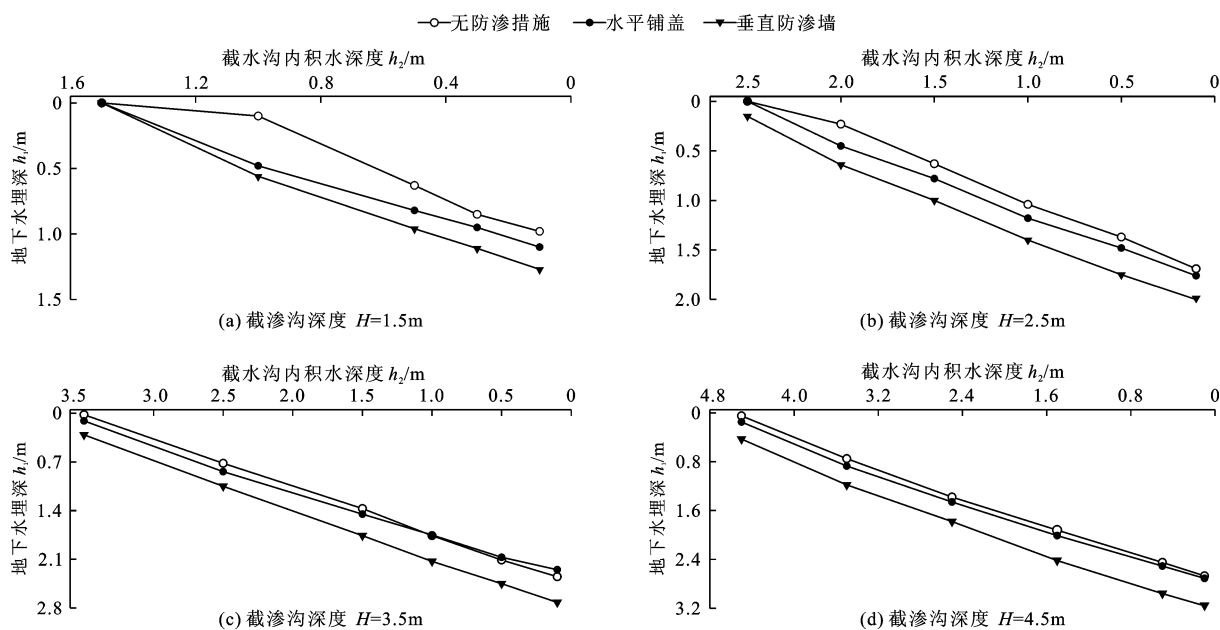


图9 3种防渗工况下坝后地下水位埋深随截渗沟内积水深度的变化曲线

如图9所示,以 $H=4.5\text{ m}$ 为例,无防渗措施、水平铺盖和垂直防渗措施下沟内积水深度为4.5、3.5、2.5、1.5、0.5、0.1 m时坝后 P_{200} 处的地下水位分别为0.05、0.75、1.38、1.92、2.45、2.67 m;0.15、0.87、1.46、2.01、2.51、2.71 m;0.43、1.18、1.78、2.42、2.96、3.15 m。可知各工况下地下水位 h_1 与截渗沟积水深度 h_2 的变化趋势基本一致,基本呈线性变化。 h_1 与 h_2 呈反比,即截渗沟中积水深度 h_2 越低,积水量越小时,地下水埋深 h_1 越大。其中,水平铺盖措施下, h_1 随 h_2 的变化较为平缓,无防渗措施其次,垂直防渗措施变化最为明显。通过综合对比发现,垂直防渗措施结合“截渗-导渗”的作用效果是

无防渗措施条件下的1.16~1.30倍,是水平铺盖措施条件下的1.15~1.21倍。

上文所述,截渗沟的深度越大,增大地下水埋深效果也越明显,但考虑到施工经济等问题,开挖深度不宜过大,因此需要确定不同工况下合理的截渗沟开挖深度。分析图9(d)可知, $H=4.5\text{ m}$ 时,当截渗沟内积水全部排出,下游水位达到稳定后,水平铺盖措施下 P_{200} 处的地下水埋深 $h_1=2.71\text{ m}$,无防渗措施下的地下水埋深 $h_1=2.67\text{ m}$ 。由于恰拉水库周边农田土壤不发生盐渍化的地下水临界水深 $H_k=2.45\text{ m}$,这两种工况下的地下水埋深正好略大于“临界水深”。因此在“截渗”与“导渗”联合作用的

条件下,截渗沟深度设计为 $H = 4.5 \text{ m}$,最有利于无防渗措施和水平铺盖措施下防止坝后发生土壤盐渍化的现象。

在垂直防渗措施下 $H = 4.5 \text{ m}$ 时, $h_1 > 3.0 \text{ m}$,其地下水埋深太深时不利于植株根系的生长。观察图 9(c) 发现, $H = 3.5 \text{ m}$ 时,垂直防渗措施下坝后 200 m 处的地下水埋深 $h_1 = 2.72 \text{ m}$ 正好位于“临界水深”以下。

综上可得,在“截渗”与“导渗”的联合作用下,无防渗措施、水平铺盖、垂直防渗的最适截渗沟设计深度分别为 4.5、4.5、3.5 m。

5 结 论

本文基于非饱和渗流理论,以干旱区典型平原水库——恰拉水库为研究对象,系统研究了水库防渗、排渗和导渗对大坝下游周边农田地下水水位的影响,结论如下:

(1)综合防渗与截渗、导渗联合计算结果,垂直防渗优于水平铺盖,水库防渗效果越好,下游截渗和导渗的压力就越小,并可适当降低坝后截渗沟的深度和相应开挖工程量。

(2)截渗沟越深,沟内积水深度越小对降低下游地下水水位越有利。截、导联合使用下,无防渗措施、水平铺盖、垂直防渗墙结合截渗沟的最适深度分别为 4.5、4.5、3.5 m。

(3)防渗在总体上控制了渗流量,截渗有效地截断了坝后渗流量,“导渗”则解决了渗流的“去处”问题,使截渗沟对坝后农田地下水的控制效果具有持续性。防、截、导三者联合作用可以有效地将坝后农田地下水位控制在“临界水深”以下,防止坝后农田发生土壤盐渍化。

参考文献:

- [1] 李荣荣,黑 钢,段鹏程,等. 干旱区平原水库下游盐渍化土壤光谱时空分布特征分析[J]. 土壤通报,2016,47(3):532-536.
- [2] 陈 诚,龚 懿,王 洁,等. 悬链线形断面渠道临界水深的直接计算方法[J]. 灌溉排水学报,2016,35(11):29-33.
- [3] 柳莹. 新疆平原水库下游盐渍化问题初探[J]. 陕西水利,2013(4):125-126.
- [4] 束一鸣,吴海民,姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报,2016,38(S1):1-9.
- [5] 毛昶熙. 悬挂式防渗墙的优越性[J]. 中国水利,2010(8):41-42.
- [6] 毛海涛,王正成,王晓菊,等. 水库防渗措施及坝后排水沟距离对周边农田地下水埋深的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(11):98-107.
- [7] 罗 炤,李 山,贾忠华,等. 兼顾农业生产与环境保护的农田控制排水研究进展[J]. 农业工程学报,2013,29(16):1-6.
- [8] 李 山,罗 炤,贾忠华,等. 反渗条件下排水沟与农田水盐交换关系[J]. 农业工程学报,2015,31(2):94-101.
- [9] 潘延鑫,罗 炤,贾忠华,等. 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测[J]. 生态学报,2014,34(3):597-604.
- [10] KARANDISH F, ŠIMŮNEK J. Two-dimensional modeling of nitrogen and water dynamics for various N-managed water-saving irrigation strategies using HYDRUS[J]. Agricultural Water Management,2017,193:174-190.
- [11] 毛海涛,樊哲超,何华祥,等. 干旱、半干旱区平原水库对坝后盐渍化的影响[J]. 干旱区研究,2016,33(1):74-79.
- [12] 费 康,张建伟,ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:205-216.
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.
- [14] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988. 19-22.
- [15] 申治鑫,周金龙,周殷竹. 新疆恰拉水库下游土壤非冻结期水盐动态分析[J]. 节水灌溉,2013(10):35-37.
- [16] 李 明,宁立波,卢天梅. 土壤盐渍化地区地下水临界深度确定及其水位调控[J]. 灌溉排水学报,2015,34(5):46-50.
- [17] 王艳哲,邵立威,刘秀位,等. 小麦和玉米根系取样位置优化确定及根系分布模拟[J]. 植物生态学报,2013,37(4):365-372.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 灌溉与排水工程设计规范:GB 50288-2018[S],北京:中国计划出版社,1999.
- [19] 毛海涛,何华祥,邵东国,等. 无限深透水坝基上悬挂式防渗墙控渗试验研究[J]. 水利水运工程学报,2014(4):44-51.
- [20] CHOO L P, YANFUL E K. Water flow through cover soils using modeling and experimental methods[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000,126(4):324-334.