

文章编号:1001-5485(2010)04-0016-04

亭子口水利枢纽低地垫高农田防护工程保水性能研究

查元源¹, 刘洁颖², 伍靖伟¹, 刘松¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
2. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院规划处, 武汉 430010)

摘要:针对亭子口水利枢纽农田防护工程低地垫高方案的保水性能,在室内大型土柱试验的基础上,建立基于Richards方程的一维饱和-非饱和水流运动数学模型,模拟分析不同防护方案条件下土壤水分的运动过程和保水性能。结果表明:目前拟采用的70 cm耕作层防护方案通过适度压实保水性能良好,所建模型和所得相关成果可以为类似工程提供参考。

关键词:亭子口水利枢纽;低地垫高;保水性能;数值模拟

中图分类号:TV93;S277.7 **文献标识码:**A

为了保护亭子口水利枢纽库区耕地免受库区尾水淹没,解决移民生产生活问题,农田防护工程拟采用低地垫高方案,即先将耕作层剥离,然后用砂卵石混合土层垫高至安全高度,再将耕作层回填。低地垫高方案实施后,由于土层结构和土壤水运动条件的改变,可能会带来一些问题:下垫层的材料为砂卵石混合土材料,透水性较强,保水性能较差,可能形成俗称的“倒蒙金”土,会导致渗漏、土肥流失等问题。为了验证工程的可行性,同时取得工程施工时的必要参数,作者在武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室进行了大型土柱保水性能试验,并在此基础上建立了一维饱和-非饱和水流运动数学模型,进而对不同防护方案条件下土壤水分运动过程和保水性能进行了数值模拟分析。

置及填充土料如图1所示。

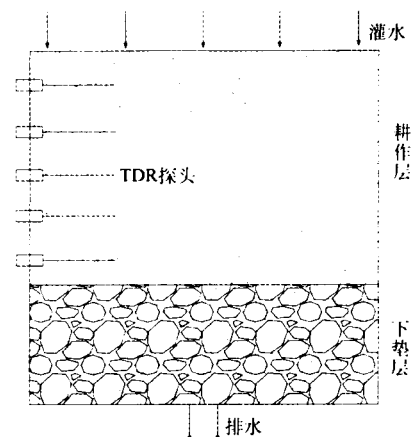


图1 大型土柱试验装置

Fig.1 Large-scale soil column test device

1 试验介绍

1.1 试验装置及土样材料

试验在大型土柱中进行。土柱由多层40 cm × 40 cm × 30 cm的方形钢制容器拼接而成;每层土柱壁以10 cm为间距安装TDR土壤含水率探头,实时监测土壤含水率变化;最下一层土柱底部留有排水口,监测排水情况。

试验耕作层土样为在库区罗家桥和安全坝两地挖取的土样,分别代表保护区的砂土和粉砂土类型。在取土前进行了土壤原位测试,获取了耕作层土样的容重、孔隙度、田间持水量等基本参数。垫层材料来自库区河床附近的天然砂卵石料混合土。试验装

1.2 试验方法和方案

试验方法主要是在土柱上部人工灌水,观测水层的深度变化;通过TDR观测不同深度土壤含水率随入渗时间的变化;在土柱底部收集排水,观测排水时间和排水量。通过上述3种数据定量分析该工程方案的保水性能。

各试验方案主要改变灌溉水量、土壤初始含水率、耕作层土壤质地、耕作层厚度、耕作层干密度,以对比不同试验方案下土柱保水性能的差异。

2 数学模型

2.1 控制方程

一维垂向土壤水流运动用Richards方程描述,

收稿日期:2009-05-07

作者简介:查元源(1987-),男,安徽怀宁人,硕士研究生,主要从事地下水资源与环境方面的研究,(电话)13100616800(电子信箱)zhayuan87@126.com

即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

式中： θ 为土壤体积含水率； h 为土壤水分负压 (cm)；垂直坐标 z 向下为正 (cm)； t 为时间 (h)； S 为根系吸水项或其它源汇项 (h^{-1})； K 为土壤非饱和水力传导度 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

2.2 定解条件

边界条件：模拟中，下边界排水，采用渗出面边界。其表达式为，当 $h < 0$ 时， $q = 0$ ；否则 $h = 0$ 。其中： h 为边界处土壤负压； q 为边界流量通量。上边界灌溉，采用大气边界，其表达式为， $h > 0$ 时， $\theta = \theta_s$ ； $h \leq 0$ 时， $q = 0$ 。其中 θ 为边界处土壤含水率。本文中上边界均为初始时刻建立 20 cm 水层，自由入渗。

初始条件： $h(z, 0) = h_0(z)$ ，即初始时刻的土壤剖面负压已知。

2.3 土壤水分运动参数

2.3.1 土壤水分运动参数模型

土壤水分运动参数主要包括土壤水分特征曲线参数和非饱和土壤水力传导度，可应用 van Genuchten^[1]模型来表示：

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中：

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (4)$$

$$K_r = S_c^l [1 - (1 - S_c^{1/m})^m]^2 \quad (5)$$

$$S_c = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

式(2)至式(6)共有 5 个未知参数，分别为 $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s$ 。其中 θ_r 为残余体积含水量； θ_s 为饱和体积含水量； K_s 为饱和水力传导度 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)； S_c 为饱和度。 $\alpha (\text{cm}^{-1})$ ， n, m 和 l 是反映土壤水分曲线特征的经验常数，本文中 l 取为 0.5， m 由式(4)求得。

2.3.2 土壤水分运动参数选择

根据实测的土壤颗粒分曲线和天然干密度，利用 RETC 软件拟合，得到天然干密度下试验土料的土壤水分运动参数，如表 1 所示。

不同于密度下，土壤上述各参数值的变化将在方案分析中具体说明。

表 1 天然干密度下的土壤水分运动参数

土壤类别	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	θ_r	θ_s	θ_{III}	α / cm^{-1}	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$
罗家桥砂土	1.51	0.067	0.43	0.23	0.015	2.12	4.37
安全坝粉砂土	1.51	0.067	0.47	0.35	0.014	1.50	3.50
下垫层混合土	2.10	0.052	0.44	0.25	0.029	1.69	10.50

注： θ_{III} 为天然田间持水量， $\theta_r, \theta_s, \theta_{III}$ 均是体积含水量。

3 部分试验数据及模型验证

多组试验取得了各时间含水率剖面、灌水水层厚度、累积排水量 3 类数据。数据显示本工程采用低地垫高方案是合理的。限于篇幅，本文对试验数据不作详细说明，仅列出单组试验部分数据，以确定模型和参数的选择是否合适，数值模拟是否合理。

该单组试验耕作层为 70 cm 罗家桥砂土，下垫层为 30 cm 砂砾石混合土，土壤水分运动参数见表 1，初始含水量 $\theta_0 = 0.17$ ，并且是按天然干密度均匀填充的。用 HYDRUS-1D 软件模拟和试验中 TDR 监测分别得到的耕作层土壤剖面体积含水率结果对比如图 2 所示。

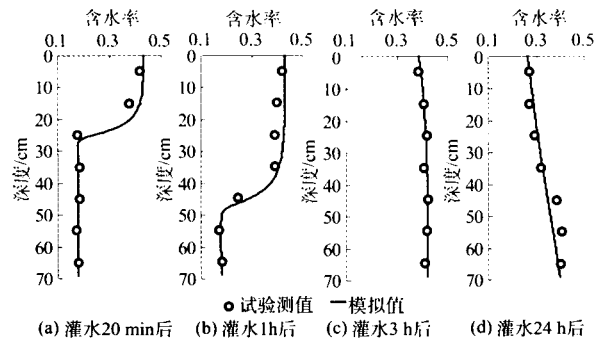


图 2 土柱耕作层不同深度含水率试验值与模拟值比较

Fig. 2 Comparisons of moisture content at different depths from experiment and simulation at arable layer in soil column

从图 2 可以发现，试验得出的土壤入渗速度与模拟值是一致的，而且各个时间段的剖面含水率曲线也符合很好。但图中也反映出存在一些差异，产生这些差异的一个可能原因是土柱试验的土层是分层手工填充的，土壤干密度难以达到完全均匀，加上土壤自身的自然沉降作用，导致下部土壤干密度有所增高，因此模拟结果有细微差别，但整体模拟结果

与实测一致。

图 3 是耕作层下边界累计排水量的数值模拟和实测结果,两者非常吻合。这进一步说明,所建立的模型和所使用的参数能够模拟农田防护工程低地垫高方案的土壤水分运动过程。

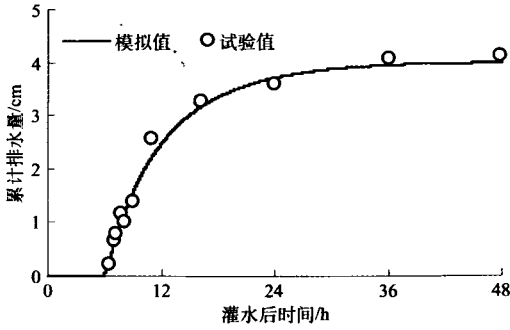


图 3 土柱下边界累计排水量试验值与模拟值比较

Fig.3 Compare of cumulative drainage volumes from experiment and simulated data at lower boundary in soil column

从图 3 还可以看出,灌水后 2 d 共排水不到 4 cm,即计算土层(包含 30 cm 的下垫层)能蓄住 80% 的灌溉水量。而且试验和模拟结果均表明,充分灌溉 2 d 后,罗家桥砂土的平均含水率为 0.22 ~ 0.29;安全坝粉砂土为 0.30 ~ 0.38,均超过天然田间持水量,能满足一次灌溉维持长时间作物需水要求。

4 方案分析

4.1 不同耕作层土壤质地方案

耕作层土壤质地不同,其保水性能可能不同。为此,再取安全坝的粉砂土作为耕作层土壤,耕作层仍为 70 cm,下垫层仍为 30 cm,进行模拟计算。两种情况下设置的观测点(15 cm 深和 45 cm 深处)体积含水率变化对比如图 4 所示。

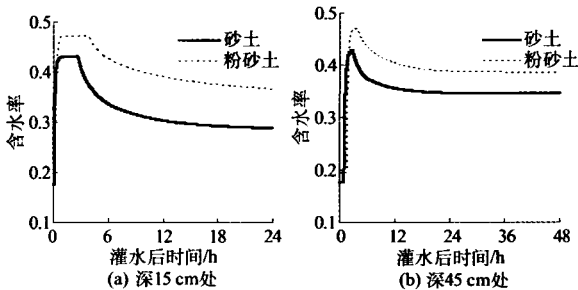


图 4 不同耕作层土壤质地下的土壤含水率变化

Fig.4 Variety of moisture content of arable layers with different soils

模拟结果表明,粉砂土的平均含水率高于砂土。这说明,采取不同的耕作土壤,保水性能会有较大差

异,工程中应尽可能选择保水性能较好的土壤。

4.2 不同耕作层土壤深度方案

根据渗流垂直于土壤分层面时渗透系数主要决定于渗透系数值较小的土壤^[2],可知低地垫高方案中起主要保水作用的是渗透系数相对小的耕作层土壤。将耕作层调整为 100 cm、下垫层仍为 30 cm,模拟结果与耕作层 70 cm、下垫层 30 cm 的方案对比如图 5 所示。

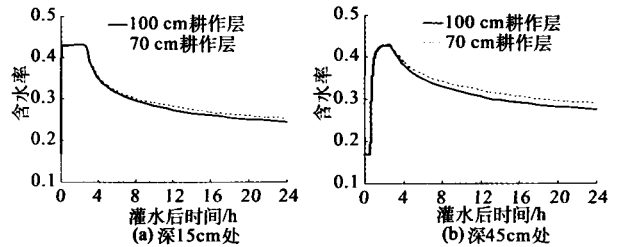


图 5 不同耕作层厚度下的土壤含水率变化

Fig.5 Variety of moisture content of arable layers with different thicknesses

从图中可以看出,耕作层厚度分别为 70 cm 和 100 cm 方案的人渗速度是同步的。而由于罗家桥砂土的 n 值较大,退水较快,导致同一时间同一深度下是 100 cm 耕作层厚度的土壤含水率较小。这说明,在耕作层厚度达到 70 cm 后,继续增加耕作层土壤厚度不能明显增强保水作用。考虑到植物根系生长一般需求耕作层大于等于 70 cm,工程施工时可以取土壤耕作层厚度为 70 cm。

4.3 不同土壤干密度方案

不同压实程度,亦即不同干密度,必然带来土壤的渗水性能和保水性能发生变化。通过不同干密度下土壤吸力试验,得知当某种土壤的干密度 ρ_d 变大时,参数 θ_s, K_s 会减小;而 θ_r, α, n 的变化幅度非常小。因此这里假设密度改变时,同种土壤的参数 θ_r, α, n 保持不变。

理论上,土壤饱和时,水完全充满土壤的孔隙,那么土壤饱和含水率与土壤干密度存在以下理论关系,即

$$\theta_s = p = 1 - \rho_d / \rho_s \quad (7)$$

式中: p 为土壤孔隙度; ρ_d 为土壤干密度 ($g \cdot cm^{-3}$); ρ_s 为土粒密度 ($g \cdot cm^{-3}$)。

但实际中土壤水分往往难以完全充满孔隙,相关试验也发现干密度改变时,土壤饱和含水率只能近似按式(7)变化,有时需要对其进行修正^[3]。本次试验通过测量罗家桥砂土不同压实程度时的干密度和相应饱和含水量,得到了二者在一定范围内的相关关系为

$$\theta_s = p = 0.98 - 0.979\rho_d / \rho_s \quad (8)$$

对于罗家桥砂土, $\rho_s = 2.69$ 。由式(8)知,当罗家桥砂土 ρ_d 分别为 1.37 g/cm^3 (0.9倍原干密度) 和 1.66 g/cm^3 (1.1倍原干密度) 时,对应的 θ_s 分别为 0.481 和 0.375。

对于饱和渗透系数与土壤干密度的关系,本文中采用刘杰公式^[4],

$$K_s = 234p^3 d_{20}^2 \quad (9)$$

式中: K_s 单位为 cm/s ; d_{20} 为等效粒径;对于罗家桥砂土取为 0.008 cm 。

根据土壤密度和孔隙度的关系,可将式(9)改写为

$$K_s = 234(1 - \rho_d/\rho_s)^3 d_{20}^2 \quad (10)$$

当罗家桥砂土的干密度变为 1.37 g/cm^3 和 1.66 g/cm^3 时,代入式(10)计算得饱和渗透系数从 4.37 cm/h ,分别变为 6.70 cm/h 和 3.09 cm/h 。该数据得到了试验的验证。

干密度采取 4 种不同方案:①田间干密度,即 1.51 g/cm^3 ;②田间干密度的 1.1 倍;③田间干密度的 0.9 倍;④耕作层上层 40 cm 采用 0.9 倍田间干密度,下层 30 cm 采用 1.1 倍田间干密度。模拟结果对比如图 6 所示。

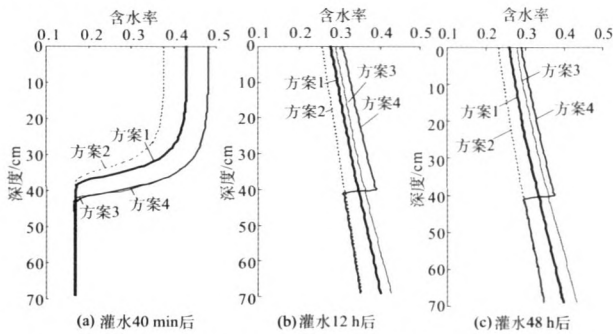


图6 不同耕作层土壤干密度方案下的土壤含水率剖面
Fig. 6 Moisture content of arable layers with different soil densities

从图6可以看出,采用干密度为天然干密度的 0.9~1.1 倍时,土壤灌水 48 h 后的含水量(亦即田间持水量)均大于天然田间持水量 0.23。

此外,还可以看出方案4为最佳方案。方案4的初始入渗速度与方案3同步,但退水曲线比方案3滞后,因此,在灌水后同一时间上方案4在土壤 40 cm 深度以内保持的水分更多。实际上,这样做就使得土壤结构有了“蒙金土”的特征。采取“上松下密”的原则,在不显著增加入渗速度的情况下,提高了计划湿润层土壤的田间持水量,减少了深层渗漏量。同样可知增大垫层干密度对保水持水都非常有利。

通过试验也得到了相同的结论。同时试验还表

明:当土壤过于松散,在灌水等条件下,土壤会在重力作用下自然沉降、压实;而使土壤非常密实既增加成本也不利于作物生长。因此,干密度变动应有一个范围,可根据实际情况参照方案4进行施工。

5 结论

本文根据水库淹没区低地垫高农田防护工程的实际需要,在室内进行大型土柱试验,同时建立低地垫高双层土壤结构的非稳定土壤水分运动数值模型,对不同防护方案进行了模拟分析,得到如下结论:

(1) 通过试验检验了所建立的低地垫高土壤水分运动模型的合理性,模型可适用于其他低地垫高农田防护工程的保水性能分析;

(2) 室内试验和数值模拟结果表明,亭子口水利枢纽库区农田防护工程采用低地垫高方案保水性能良好;

(3) 耕作层土壤厚度取 70 cm 即可。施工时,耕作层采用上松下密的原则,并宜在天然干密度的 0.9~1.1 倍变动比较合适;垫层尽量压实,保证大于其天然干密度。

参考文献:

- [1] Van GENEUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [2] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997. (XUE Yu-qun. Groundwater dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese)).
- [3] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 154-157. (LU Dian-qing, SHAO Ming-an, LIU Chun-ping. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 154-157. (in Chinese)).
- [4] 沙金焯. 农田不稳定排水理论与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004: 35-38. (SHA Jin-xuan. Theory and Calculation of Farmland Unsteady Drainage [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2004: 35-38. (in Chinese)).

(编辑:周晓雁)

(下转第 27 页)

[2] 刘恒, 耿雷华, 裴源生, 等. 南水北调运行风险管理关键技术问题研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(5): 4-7. (LIU Heng, GENG Lei-hua, PEI Yuan-sheng, et al. Research on key technology in risk management during operation of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(5): 4-7. (in Chinese))

[3] 叶伟民, 于琪洋. 水利突发公共事件应急管理现状分析[J]. 中国水利, 2006, (17): 52-56. (YE Wei-min, YU Qi-yang. Present conditions of emergency management of water accidents[J]. Water Resource of China, 2006, (17): 52-56. (in Chinese))

[4] 张成, 傅旭东, 王光谦. 南水北调中线工程总干渠非正常工况下的水力响应分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(6): 8-12. (ZHANG Cheng, FU Xu-dong, WANG Guang-qian. Hydraulic response in abnormal operation modes of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(6): 8-12. (in Chinese))

(编辑: 王 慰)

Study on Sudden Events and Contingency Regulation Measures of Transbasin Diversion Project

DUAN Wen-gang¹, HUANG Guo-bing¹, WU Bin², YU Jun¹

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Bureau of Water Resources of Shuozhou, Shuozhou 036000, China)

Abstract: A transbasin diversion project is always a large-scale and long route engineering, and meanwhile, there exist many complex geological conditions and large differences in geomorphologic settings and meteorologic conditions along the project route. It is urgently required to cut off the flow or decrease it by a wide margin through gates for accident prevention at a short time so as to control the harm due to a sudden event and adopt corresponding measures when a sudden event caused by a natural disaster, a communication accident or other security event occurs all at once. This article focuses on categorizing the sudden events which probably happen in the normal water supply process of the transbasin diversion project and puts forward relevant emergent water transfer dispatch measures according to four aspects which include the safety of water quality, the security of the open channel and the hydraulic structure, the fault of the equipment and the safety of the society. We propose the objective and principle of emergent dispatching of a sudden event and the train of thought for further research.

Key words: disaster reducing of engineering; transbasin diversion; sudden event; emergent plan; emergent water transfer dispatch

=====

(上接第 19 页)

Study on Water Retention Performance of Lowland Heightening Farmland Protection Project in Tingzikou Water Control Pivot

ZHA Yuan-yuan¹, LIU Jie-ying², WU Jing-wei¹, LIU Song¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: To research the water retention performance of lowland heightening farmland protection project in Tingzikou Water Control Pivot, large-scale soil column experiments and one-dimensional saturated-unsaturated flow simulations have been performed. The results show: (1) 70 cm thick arable soil layer with appropriate compaction can ensure satisfying water retention performance; (2) the established model and the results obtained in the paper can provide a reference for similar projects.

Key words: Tingzikou Water Control Pivot; lowland heightening; water retention performance; numerical simulation