

Application of Hydrostatic Method for Lateral Seepage Test in Large-Scale Earth Canal

Buhui Chang, Yuli Luo, Yanhua Wang, Geng Chen

Water Diversion and Irrigation Engineering Technology Center, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Xinxing Henan
Email: changbuhui@163.com

Received: Sep. 10th, 2017; accepted: Sep. 23rd, 2017; published: Sep. 27th, 2017

Abstract

In this paper, hydrostatic method is applied in the lateral seepage test of large canal, and the sub-main channel in the Shen Wu irrigation district of He Tao irrigation district is taken as an example. Application of hydrostatic method in large-scale canal, the calculation method of the main parameters, and the existing problems and improvement methods are analyzed in this paper. The experiment indicates that using the hydrostatic method in large-scale canal is feasible, and the precision is high, but the cost is larger, higher requirements on test equipment.

Keywords

Hydrostatic Test, Large-Scale Canal, Channel Leakage

静水法在大型土渠测渗中的应用

常布辉, 罗玉丽, 王艳华, 陈 赓

黄河水利科学研究院引黄灌溉工程技术研究中心, 河南 新乡
Email: changbuhui@163.com

收稿日期: 2017年9月10日; 录用日期: 2017年9月23日; 发布日期: 2017年9月27日

摘 要

本文针对静水法在大型土渠测渗中的应用开展研究, 以河套灌区沈乌灌域分干渠为试验实例, 分析了静水法在大型土渠中的应用过程, 主要参数的计算方法, 以及其中存在的问题和改进方法。实验表明: 静

水法在大型土渠上的运用是可行的,且精度较高,但产生的费用较大,对试验设备要求较高。

关键词

静水试验,大型土渠,渠道渗漏

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

开展以节水为中心的大型灌区续建配套与节水改造工作已经成为 21 世纪实现灌区水资源可持续利用和经济社会可持续发展的重要战略举措。灌区节水改造的主要方式就是田间节水和渠道衬砌,目前在田间节水措施实施范围较小的前提下,渠道衬砌节水量被视为大型灌区节水的主要来源。因此渠道衬砌前后真实渗漏量的测算成为了大家关注的重点,同时也关系到节水改造方案中渠道衬砌前后理论节水量的精度。

《渠道防渗工程技术规范 GB 50600-2010》中规定,渠道有下列要求时,应进行渗漏测验:对比各种渠道渗漏损失;检验渠道防渗效果,对施工质量进行评价;推算渠系(渠道)水利用系数;进行渠道防渗技术的试验研究与材料防渗性能检验。并规定渠道渗漏损失测验宜采用静水法或动水法。然而动水法要求渠道的具有一定的长度、沿程顺直、沿程闸门关闭不漏水,并结合水流条件、运行调度方案、仪器配备和人员分配进行综合评价是否采用。动水法条件限制较多,精度较差(尤其在衬砌之后渗漏量很小的渠道)。因此实用静水法是目前精确测验渠道渗漏量的主要方式。结合实际工作发现,静水法虽然精度较高,但仅适合较小渠道。另外,静水法可以测算渠道由初渗到稳渗的过程,较动水法可以更加精确的反映渠道渗漏规律。

90 年代,国内开展了大量的静水试验工作,用以测算灌区的渠系水利用系数。其中山西省水利厅,山西省水利科学研究院组成了渠系渗漏测验组,对全省 18 个万亩以上灌区开展了静水试验,摸清了灌区渠道渗漏状况[1],可以看出静水法在灌区渠道渗漏测算中的大面积应用。此后针对于静水法与动水法的比较、静水法变水位阶段、基于静水法的渠系水利用系数等开展了大量的试验研究[2]-[13]。更加深入的研究了静水法在各类渠道不同条件下的应用。然而静水法在大型土渠中的应用研究比较少,且均是一笔带过,没有细致的应用过程论述。鉴于此,本文针对静水法在大型土渠中的应用做了细致的过程说明,可为今后静水法在大型土渠中的应用提供方法上的参考。

静水法测验渠道渗漏量过程中主要分为恒水位和变水位两个过程。恒水位是在试验初期,保持试验渠段水位在测验水位和下降水位之间变动,直到判定渠道达到稳渗为止(该过程分为称量法和水位下降法,鉴于实施过程中注入水量的大小进行选择)。之后进入变水位测验阶段,该阶段是按照固定时间内试验渠段中水位下降的变化反映不同运行水深时的渗漏量。在较大的渠道中,因为注入的水量较大,因此通常选用水位下降法进行渗漏量的测量。

2. 静水法试验方法与原理

静水法的主要监测项目由测试段水量差、降雨量观测和蒸发量观测[14]。以上三者和入渗量的关系见式 1:

$$Q = \Delta W + P - E \quad \text{式 1}$$

式中： Q 表示两次水位观测期间，测试段单位渠长的入渗量(m^3)； ΔW 表示两次水位观测期间，试验段单位渠长实测的水体变化量(m^3)； P 表示两次水位观测期间，根据实际雨强计算出的，进入测试段 m^3 的降水量(m^3)； E ——为两次水位观测期间，根据原测蒸发强度计算的每米试段的蒸发量(m^3)。依据水量平衡原理的静水法试验区见图如下：

由图 1 可以看出，试验区主要由四个土坝，三个渠段组成。其中土坝的规格在筑坝时尽量保持一致，试验区两侧的土坝中间要有防渗层，且防渗层的宽度应在渠道两侧各自超出渠宽至少 1 米，以防各个区间发生渗漏和绕渗。两个平衡区的作用是为了防止试验区段纵向水力坡度的干扰，试验期间三个区间的水位始终保持一致。

3. 试验方法

试验的主要设施即测试渠段，辅助设施有水尺、蒸发皿、雨量计、计时器、注水管、水泵、水表、输水带、记录本和供水水源等。本次试验的渠道选择地点为内蒙古河套灌区沈乌灌域的建设一分干，渠道宽度达 8 m，长度为 50 m，位于一号分水闸上游 2 km 处。试验开始时间为 2015 年 10 月 12 日下午 15 点左右，前后历时 9 天，准备 2 天，正式注水至变水位结束为 7 天。土坝由挖掘机加人工夯实筑成，两个平衡区和试验区中水尺经过全站仪测量均保证在一条水准线。降水量和蒸发量由磴口县气象局提供。

4. 监测要素

静水法的监测要素见表 1 所示。

大型土渠试验同小型土渠或者衬砌之后的渠道最大的试验难度就是不同测量水深下的渠段水体体积(因为大型土渠横断面变化比较大，不同水深对应的断面面积和渠段水体体积难度较高)。

5. 数据计算

针对渠道横向和纵向的变化特点，将渠段划分为 11 个断面，每个断面之间间隔 3 米，并使用全站仪进行断面形状和相对高程测量，以所测数据中的最低点作为该试验区的高程零点。利用 ARCGIS 软件对数据进行计算，从 0 至 2 m 分每 5 cm 为一个水深间隔，计算得出试验区的水位库容曲线。ARCGIS 中断面划分结果见图 2。

由断面形状可以看出，渠道断面面积较大，描述断面形状的点较多，相对于标准体型断面而言，相关参数的计算就比较麻烦，但是熟练 ARCGIS 软件或者编程就能比较快捷的解决。这里使用 ARCGIS 软件进行了断面划分、不同水深对应断面面积 Sh 以及断面湿周长 Ch 的提取。由 Sh 加上渠段每个断面之间的距离，可以计算出不同水深下试验区对应的水体体积，不同水深之间的水量差计算便迎刃而解。计算公式见式 2。



Figure 1. Longitudinal section of test area
图 1. 试验区纵向剖面图

Table 1. List of main parameters of Hydrostatic test
表 1. 静水法主要参数列表

参数类型	参数说明	单位
实测数据	试验区各个渠段长度	m
	土坝上下底长度	m
	水尺读书	m
	降水量	mm
	蒸发量	mm
	时间	h
	渠段不同断面相对高程(主要在土渠中应用)	m
计算数据	不同断面对应的测量水深的断面面积	m ²
	不同水深对应的试验区湿周线	m
	不同水深对应的试验区湿周面面积	m ²
	不同断面对应测量水深的水体体积	m ³
	不同水位之间的水量差	m ³
	渗漏强度	kg/(m ² ·h)

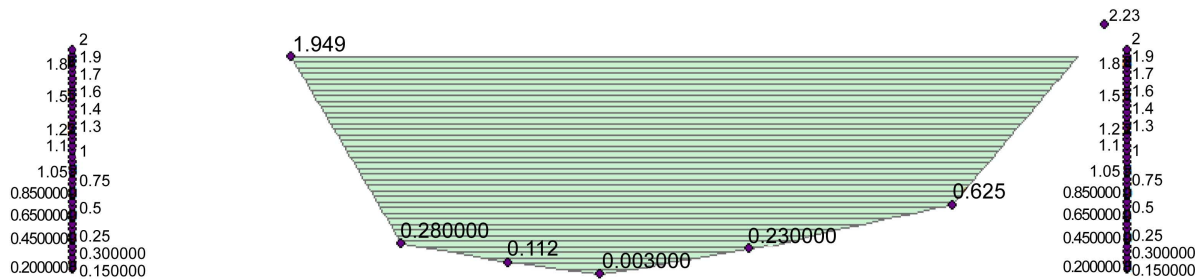


Figure 2. Section division of different water depths
图 2. 不同水深的断面划分

$$Vh = 1.5 \times Sh_1 + 3 \times Sh_2 + \dots + 3 \times Sh_{10} + 1.5 \times Sh_{11} \quad \text{式 2}$$

其中 Vh 表示当水深为 h 时, 试验区的水体体积, Sh_n 表示当水深为 h 时, 试验区从上游至下游划分的 11 个断面面积, Sh_1 位上游第一个断面, Sh_{11} 表示下游第一个断面。由式 2 计算的试验区水体体积与水深的关系见图 3 所示。

下一步, 由不同水深对应的断面湿周长 Ch , 便可以计算得到不同水深对应的湿周面积。计算方法同式 2 相似, 不在赘述。

6. 试验监测数据及渗漏强度分析

6.1. 恒水位阶段

采用水位下降法观测, 虽然下渗量仪和时段始末的水量差有直接关系, 但时段始末测段内水深变化过大将降低试验准确度, 为了减少误差, 根据试验规范要求, 水位下降幅度 ΔH 如下, $0.5 \text{ cm} \leq \Delta H \leq 5 \text{ cm}$ [15]。本次试验鉴于试验区容积较大, 加之注水水泵注水流量的限制, 选取 $\Delta H = 0.3 \text{ cm}$ 。恒水位观测结果的标准要求是前后测定结果满足下式要求:

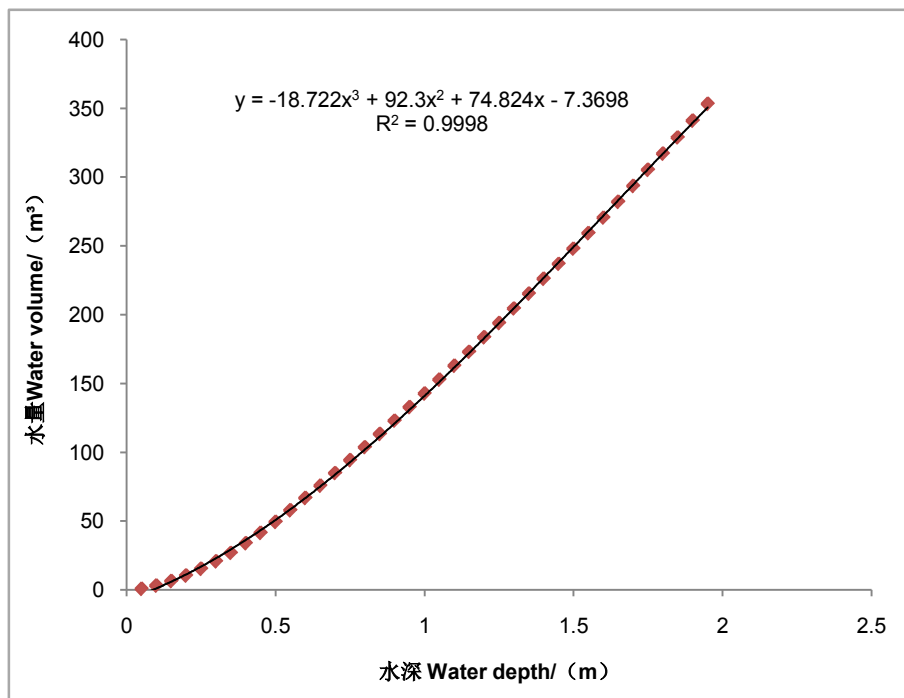


Figure 3. Relationship between water and water depth in test area
 图 3. 试验区水量-水深关系曲线

$$\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\min}} \times 100 \leq 5\% \tag{式 3}$$

即可认为恒水位下渗基本稳定，测试可以结束。式中 Q_{\max} , Q_{\min} 为实验观测后期两相邻测次的强度，前者为入渗强度较大的测次，后者为入渗强度较小的测次[15]。

入渗强度计算如式 4 所示：

$$Q_r = \frac{\Delta W + P - E}{\Delta t \cdot TS} \tag{式 4}$$

Q_r —入渗强度(kg/m²·h)

式中： ΔW —试验区中两个水位间水体的变化量(kg 或者 m³)

Δt —最高水位到最低水位的时间(h)

TS —湿周面积(m)，计算湿周面积时采用观测初水深和末水深对应的湿周面积的差值

P, E —观测时段内降雨量和蒸发量(mm)。

恒水位测试采用试验区水位下降法，在每一个观测时段的开始和末了准确地测出测验渠段水位以及时间，以此计算在该时段试验区内水体的变化量 ΔW ，同时记录蒸发和降雨量，观测完毕后集中加水，使平衡区和试验区水位均恢复到开始时的水位，然后开始下时段的观测，所加水量不计量(本次试验进行计量，作为水量-水深曲线的一个简单验证)，补水后的水位等于测试采用的恒水位，观测时间随着时间的推移而越来越长，直到进入稳渗期保持相对稳定，用两次观测水体的变化量 ΔW ，加上降雨扣除蒸发，得到每次观测间的渗漏强度。进一步根据试验区的湿周面积(TS)和测段长(L)以及时段的长短，分别算各时段单位面积的渗漏强度 Q_r (kg/m²·h)。经过多次测量，直到渠道进入稳定状态，得到恒水位时段平均入渗强度 Q_r 随入渗时间(t)的变化关系，详见图 4 所示。

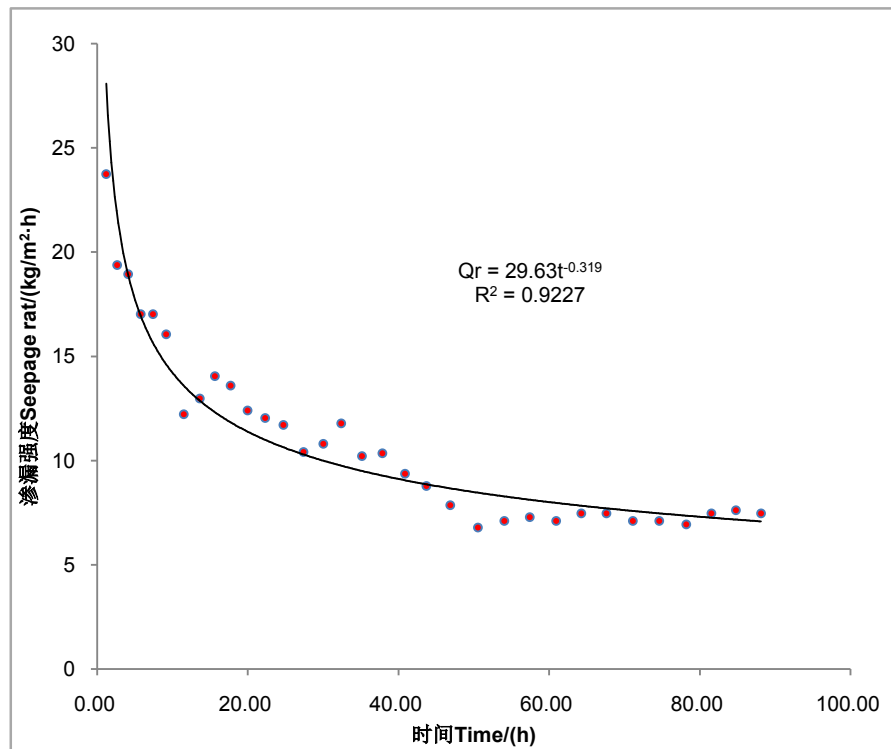


Figure 4. Relationship between intensity and time of seepage in test area

图 4. 试验区渗漏强度-时间关系曲线

对于以上所得测试数据，可以用适应的模式模拟渠道平均入渗强度 Q_r 随时间 t 的变化过程，数据分析中，对测试数据进行回归分析，由此可得测段入渗强度与时间 t 的关系。

$$Q_r = 29.63t^{-0.319} \quad R^2 = 0.9227 \quad \text{式 5}$$

式中： Q_r ——渠道断面平均入渗强度($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

t ——测段从加水开始算起的时间(h)

从试验结果来看，试验区在注水 60 小时以后入渗接近稳定。对开始测试到稳定入渗前的渗漏阶段，考虑到渠道各种条件，为反映渠道入渗达到稳定之前的渗漏状况，我们把初渗超额量(用 Q_r 表示以 kg/m^2 计)作为渠道渗漏状况的一个参数，即不稳定状况时段内入渗量。利用稳渗强度 Q_r 和初渗超额量 Q_r 这个参数，就可以直接求出整时段 t 内单位面积的入渗量，具体推算是，利用 Q_r 值和过水时间 t 求出整个过水期间的稳定入渗量(kg/m^2)，然后加上初渗超额量，即为单位面积在 T 时段的总入渗量，设稳定入渗前的渗漏阶段为 t ，则用式 5 求初渗超额量 Q_r (kg/m^2)。

$$Q_r = \int_0^t Q_r dt = \int_0^t 29.63t^{-0.319} dt = 43.51t^{0.681} \quad \text{式 6}$$

当 $T = t$ 时，就可以利用式 6 计算出整个过水时期 T 内的入渗量(kg/m^2) Q_T ，用这种方法计算入渗量精度较高。当试验区达到稳渗时，平均渗漏强度大约为 7.286 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)，渗漏强度比较小，综合分析原因在于试验区所在渠段地下水位比较浅，在前期施工时，发现渠底有积水存在，说明地下水位埋深非常浅，因此可能造成渗漏强度较一般渠道要小的多。

6.2. 变水位阶段

在恒水观测结束后立即进行变水位测定。变水位观测采用水位下降速率法，变水位测定时，测段水

位从设计水位开始,随着测段渗透蒸发自然下降,测试中每隔一定时段,测定水深和测段中水体减少量,采用式 4 可得到各个平均水深时的入渗强度 Q_r ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)随水深 H (米)的变化关系,用回归分析方法,建立代表渠段的 $Q_r\sim H$ 曲线方程。变水位实测数据见图 5。

由图 5 可以看出,该试验区随着水深的减少,渗漏强度也随之减弱,二者拟合曲线为 $Q_r = 3.6136h^{1.2092}$, $R^2 = 0.9888$ 。

7. 对比论证

在进行静水试验的同时开展了动水法测量同一渠段的渗漏量。针对不同的渠道运行流量开展了 8 组试验。试验区段长度为 5 km,从上断面至下断面间共有支渠引水口 5 个,斗渠引水闸门 10 个。试验期间,采用流速仪对上下断面进行流量测算。而支斗渠道闸门处漏水量均较小,流速仪等测疏设备无法测量。试验开始前,对漏水程度相当的闸门进行了分组统计,选取具有代表性的闸门进行了流量测量(构建围堰集中流量进行测量)。最后根据测量结果估算出整个试验区段上引水闸门在关闭情况下的漏水量,详细结果见表 2。

由表 2 可以看出,试验区段在不同运行水深下,动水法和静水法得到的单公里渠道输水损失量相差较大。在高水深,大流量情况下,流速仪的测流精度比较高,误差相对较小。同时,也说明本文中的静水试验得到的数据更为准确。但是随着水深和流量的减小,由于流速仪的测量精度限制,动水法计算获得的单公里损失量远大于静水法得到的结果。由此可以看出,通过静水法测算渠道的渗漏损失是可行的。

8. 结论

大型土渠由于横向、纵向断面的多变性,对于试验期间的相关实体参数计算比较麻烦,普通的 EXCEL 工具不太实用,需要编程解决。然而利用 ARCGIS 相关参数进行处理更加便利有效。

恒水位试验阶段,水位变动在 1.8~1.77 m 之间。初渗期由于影响因素多,试验区平均入深强度与时

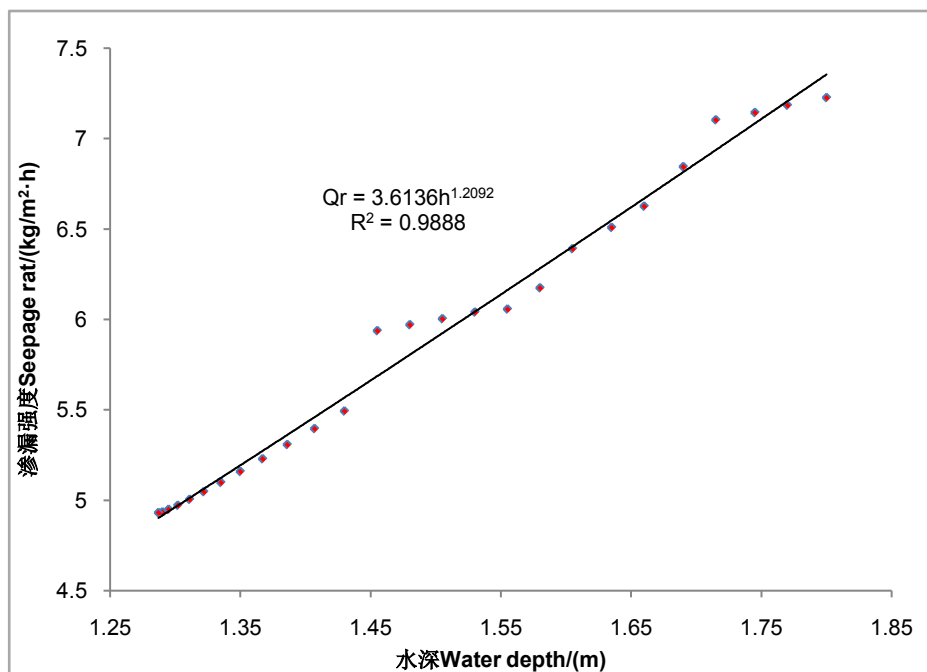


Figure 5. Relation between seepage intensity and water depth

图 5. 渗漏强度-水深关系曲线

Table 2. Flow measurement results of dynamic water method
表 2. 动水法测流试验结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
测试长度(km)	5	5	5	5	5	5	5	5
上断面流量(m ³ /s)	6.89	5.62	6.35	6.48	6.23	6.35	3.12	2.89
上断面水深(m)	1.79	1.56	1.72	1.72	1.60	1.60	1.14	1.05
上断面面积(m ²)	11.51	9.86	11.40	10.30	10.44	10.44	7.27	6.74
下断面流量(m ³ /s)	5.24	4.28	4.97	4.97	4.85	4.85	2.02	1.9
下断面水深(m)	1.00	0.94	1.11	1.11	1.02	1.02	0.78	0.72
下断面面积(m ²)	6.01	5.66	8.94	8.94	7.98	7.98	5.85	4.33
上下断面水深均值(m)	1.40	1.25	1.42	1.42	1.31	1.31	0.96	0.89
上下断面均值(m ²)	8.76	7.76	10.17	9.62	9.21	9.21	6.56	5.54
区间口门漏水流量(m ³ /s)	0.35	0.31	0.34	0.34	0.31	0.31	0.00	0.00
每公里输水损失(kg/m ² ·h)	10.64	9.56	7.36	8.79	8.33	9.28	12.07	12.87
静水法计算结果(kg/m ² ·h)	5.40	4.74	5.50	5.50	5.01	5.01	3.43	3.12

间呈幂函数关系, $Q_r = 29.63t^{-0.319}$, $R^2 = 0.9227$ 。初渗至稳渗的时间大约在 60 小时左右, 稳渗时平均渗漏强度为 7.286 (kg/m²·h)。变水位阶段, 试验区平均入深强度与时间同样呈幂函数关系, $Q_r = 3.6136h^{1.2092}$, $R^2 = 0.9888$ 。

通过静水法和动水法的比较分析可知, 动水法随着渠道运行水流条件的下降, 精度也出现明显的下降, 数据跳跃性比较大, 这与测流设备的灵敏度关系很大。然而静水法的计算结果比较稳定, 精度更可信。

本次试验影响因素较多, 因为是临时性试验, 试验渠段选择不太理想, 渠道一侧为耕地, 另一侧为沥青硬化路面和海子, 影响因素比较复杂, 加之试验期间因为护坡工作的疏漏, 出现了轻微塌方现象。为防止类似情况的发生, 可以在试验区布置时, 用塑料布对试验区护坡进行保护。

虽然普遍认为静水法观测精度较高, 但是在大型土渠上的静水试验很难得以验证。通过对测量数据的分析, 试验区数据呈现规律明显, 但较以往的研究而言, 本次试验得到的渗漏量偏小。同期动水法测量结果是静水法结果的 2~5 倍。其原因还需要进一步补充试验说明。

渠道渗漏测算规范应针对不同渠道特点, 考虑地下水、渠道尺寸等因素进一步细化, 提供更细致的参考和规定, 将更有助于静水法在灌区节水改造评估中的应用。

静水法试验比较繁琐, 前期工程量较大, 试验周期长, 需要投入大量人力物力, 在目前国家节水政策的驱使下, 灌区节水改造大面积实施, 灌区渠道衬砌率大幅度提高, 一套能够精确进行试验观测且能够有效减少人员投入的便于运输携带的自动设备急需开发。

基金项目

黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-44)。

参考文献 (References)

- [1] 郑衡, 荣丰涛. 采用静水法测试渠系渗漏及其成果的应用[J]. 水利水电技术, 1987(7): 45-51.

- [2] 黄景中, 冉茂桑, 章正为. 渠道静水法渗漏测试研究[J]. 防渗技术, 1991(2): 42-49.
- [3] 李瑞轩. 渠道静水测渗中渗漏过程法与定水位法的比较[J]. 防渗技术, 1991(2): 50-53.
- [4] 李学绩, 赵文明. FBS-1 型玻纤布防渗渠道渗漏测试及效益分析[J]. 防渗技术, 1992(4): 25-30.
- [5] 田士豪, 李林荣, 方彦军. 静水法渠道测渗计算[J]. 农田水利与小水电, 1995(8): 14-17.
- [6] 赵东辉. 静水法渠道渗漏测试分析[J]. 防渗技术, 1997, 3(2): 17-21.
- [7] Moghazi, H.E.M. and Ismail, E.S. (1997) A Study of Losses from Field Channels under arid Region Conditions. *Irrigation Science*, **17**, 105-110.
- [8] 艾合买提江·艾木拉, 依力哈木·依明江. 新疆和田灌区渠道渗漏试验[J]. 西北水力发电, 2006, 22(5): 20-22.
- [9] 李红星, 樊贵盛. 渠道水深对渠床渗漏量影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(1): 56-59.
- [10] 段雷振. 静水法试验测定托卡依干渠渗漏强度[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(11): 872-873.
- [11] 袁尧, 蔡守华, 顾宏, 等. 量测大型渠道水利用系数的简易静水法[J]. 节水灌溉, 2010(7): 73-75.
- [12] 姚立强, 毛晓敏, 冯绍元, 等. 不同防渗措施对渠道渗漏量及周边土壤水分的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1360-1366.
- [13] 柴春岭, 刘宏权, 杨路华, 等. 变水位静水法在渠道水利用系数计算中的应用[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 77-81.
- [14] 贾宏伟, 卞祖铭, 赵晓波, 等. 渠道渗漏的静水测试法[J]. 节水灌溉, 2007(8): 000043-44.
- [15] 渠道防渗工程技术规范 GB 50600-2010 2b [S].

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5507, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjas@hanspub.org