文章编号:1000-7601(2019)05-0033-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.06

模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数原型观测试验研究

翟东汉[1],何武全[1,2],赖红兵[3],娄宗科[1],霍轶珍[4]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
3.中华人民共和国水利部,北京 100053;4.河套学院,内蒙 巴彦淖尔 015000)

摘 要:为了确定模袋混凝土护坡、砂砾石护底的复合断面衬砌渠道的糙率系数,本文在内蒙河套灌区什巴分干渠(0+200~2+216)和建设二分干渠(1+910~3+040)开展了模袋混凝土复合断面衬砌渠道的原型观测试验研究,得出了不同水深和流量条件下的渠道糙率系数,并建立了渠道观测断面水力测量误差与糙率系数计算误差之间的函数关系,计算分析了什巴分干渠和建设二分干渠糙率系数观测试验的测定误差。试验得出:什巴分干渠原型观测的糙率系数最小值为 0.025 1,最大值为 0.026 7,平均值为 0.025 9;建设二分干渠原型观测的糙率系数最小值为 0.0264,最大值为 0.0279,平均值为 0.0272;什巴分干渠原型观测的糙率系数测定最大误差为 5.037%,建设二分干渠原型观测的糙率系数测定最大误差为 4.305%。模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数范围为 0.0251~0.0279,平均值为 0.0265,原型观测糙率系数测定的最大误差为 5.037%。

关键词:模袋混凝土;复合断面衬砌渠道;糙率系数;原型观测;误差分析

中图分类号:S277.7 **文献标志码**:A

Prototype observation study on roughness coefficient of bag concrete composite section lining channel

ZHAI Dong-han[1], HE Wu-quan[1,2], LAI Hong-bing[3], LOU Zong-ke[1], HUO Yi-zhen[4]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *The Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
3. *Ministry of Water Resources of the People's Republic of China*, *Beijing* 100053, *China*;
4. *Hetao University*, *Bayan Nur City*, *Inner Mongolia* 015000, *China*)

Abstract: In order to determine the roughness coefficient of the composite section channel of the concrete bag slope protection and sand gravel bottom protection, in this paper Shiba sub-channel (0+200~2+216) and Jianshe sub-channel (9+903) of Hetao irrigation area were selected to conduct the prototype observation experimental research of roughness coefficient of formed concrete composite section lining channel. The channel roughness coefficient under different water depths and flow rates were obtained. And the function relationship between the cross section hydraulic measurement error and the roughness calculation error were established. The results showed that, the minimum roughness coefficient of Shiba sub-channel prototype observation was 0.025 1, the maximum value was 0.0267 and the average value was 0.0259; the minimum roughness coefficient of Jianshe sub-channel prototype observation was 0.026 4, the maximum value was 0.0279 and the average value was 0.0272. The maximum roughness coefficient error of Shiba sub-channel prototype observation was 5.037% and the maximum roughness coefficient error of Jianshe sub-channel prototype observation was 4.305%. The range of roughness coefficient of bagged concrete full cross section lining channel was 0.0251~0.0279, the average value was 0.0265 and the maximum roughness co-

收稿日期:2018-09-10 **修回日期**:2019-08-21

基金项目:国家"十三五"重点研发课题(2016YFC0400203);内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划(NMGIRT-B1611);内蒙古自治区水利厅项目(NSK2017-N3)

作者简介:翟东汉(1993-),男, 河南商丘人,硕士研究生,研究方向为水工水力学。E-mail:491437379@ qq.com

通信作者:何武全(1967-),男,陕西合阳人,副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:hewq@ nwafu.edu.cn

efficient error was 5.037%.

Keywords: mold bag concrete; composite section lining channel; roughness coefficient; prototype observation; error analysis

随着水资源的日益紧缺,水资源的优化配置及节水灌溉的实施变得越来越重要,我国作为农业大国,通过进行渠道衬砌防渗的方式来节约水资源是缓解农业用水压力的重要途径之一[1]。渠道衬砌防渗可以有效减少输水过程中的渗漏损失,是目前应用最广泛的节水灌溉工程技术措施之一[2]。然而,冻胀破坏是制约我国北方寒冷地区渠道衬砌防渗工程建设的一个关键因素,为了解决这一问题,近年来北方灌区引进了模袋混凝土渠道衬砌技术。模袋混凝土是由上下两层高质量机织化纤布制成模袋,内充混凝土或砂浆凝结后形成高密度、高强度的固结体,具有施工机械化程度高、施工速度快、适应变形能力强、抗冻胀性能好等优点[3-5]。我国北方寒冷地区已有大量工程成功运用模袋混凝土渠道衬砌技术,如河套灌区的东风一干渠渠道衬砌防渗工程、沈阳市浑浦灌区渠道防渗衬砌工程、引滦输水明渠护坡工程等[6-8]。目前,模袋混凝土衬砌渠道的形式分为全断面衬砌和复合断面衬砌,主要应用于大中型渠道,当地下水位埋深较大、渠道底宽较窄时,通常采用模袋混凝土全断面衬砌形式;当地下水位较高、冻胀破坏严重时,通常采用复合断面(边坡为模袋混凝土,渠底为砂砾石或土基)衬砌形式。国内对复合断面衬砌渠道的糙率系数已经有了一些研究,黄宽渊[9]对湿周上有多种糙率的渠道开展研究,推导出了综合糙率计算公式;张红岐[10]借助河套灌区多年的试验数据通过拟合的方式得出了不同衬砌材料组成的复合渠道的糙率系数计算公式。但是,模袋混凝土衬砌技术由于引进时间较短,仍属于新工艺、新技术,设计标准中尚未给出模袋混凝土衬砌渠道糙率系数的取值范围,也没有模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数的计算公式,实际工程应用中设计人员一般根据经验选用,误差较大。糙率系数是渠道断面设计中重要的技术参数之一,是用来衡量渠道边壁的凹凸程度和壁面粗糙程度对水流流动产生影响的计算系数,它直接影响渠道的工程量和实际输水效果[11]。在水力计算中,糙率系数取值的准确性对工程造价和安全有很大影响[12]。南水北调中线工程的北京干线经评估,糙率系数值每下降 0.001,工程投资就会减少数亿元[13]。由此可见,在大型渠道输水工程建设中,糙率系数取值的大小,对工程量和工程造价的影响是巨大的。通过原型观测对衬砌防渗渠道的糙率系数开展研究是一种行之有效的手段。孟立敏[14]利用曼宁公式计算不同水深和流量条件下不同衬砌材料组成的复合渠道糙率系数,并利用宁夏引黄灌区复合渠道糙率系数的原型观测结果对计算公式进行了验证;张建斌等[15]在宁夏引黄灌区选取了具有代表性的 11 条不同流量级别的骨干渠道,开展衬砌渠道原型糙率观测试验,提出了不同衬砌材料的建议取值。虽然国内外对渠道糙率系数有了很多的研究,但是对于边坡采用模袋混凝土衬砌、渠底采用砂砾石砌护的模袋混凝土复合断面衬砌渠道的原型观测试验尚未见到文献资料。本文在河套灌区什巴分干渠和建设二分干渠选取模袋混凝土复合断面衬砌渠道试验渠段,开展原型观测试验,测定复合断面模袋混凝土衬砌渠道糙率系数,并进行误差分析,对模袋混凝土技术在渠道衬砌与防渗工程中的进一步应用具有重要意义。

1 原型观测试验

1.1 测试渠段的选择

进行衬砌渠道糙率系数的原型观测试验时,观测断面的选取特别重要。本次试验分别在河套灌区什巴分干渠(0+200~2+216)、建设二分干渠(1+910~3+040)布设测流段面,测流渠段要求满足以下条件:(1)测流面所在渠段顺直、水流均匀平稳,均匀无回流,测流面与水流方向垂直;(2)测桥架设前后 1 km 内均无水闸、坎等建筑物,不受上游建筑物泄流和下游建筑物回水影响;(3)测流段内无冲刷淤积;(4)测流段所处区域交通通畅,便于仪器设施等运送、安装。

1.2 试验渠段基本情况

什巴分干渠从丰济干渠第二节制闸引水,分干渠全长 32.1 km,设计引水流量为 22.0 $m^3 \cdot s^{-1}$,加大流量 26.0 $m^3 \cdot s^{-1}$。渠道防渗衬砌采用梯形断面,渠道两边坡铺设 15 cm 厚模袋混凝土防渗衬砌,混凝土强度等级为 C25、抗冻等级为 F200、抗渗等级为 W6,底部为经平整后的砂砾石。什巴分干渠试验渠段(0+200~2+216)长度 2.016 km。

建设二分干渠开口于乌兰布和灌域一干渠第一节制闸,全长 31.98 km,设计流量为 15 $m^3 \cdot s^{-1}$,加大流量 18 $m^3 \cdot s^{-1}$。渠道防渗衬砌采用梯形断

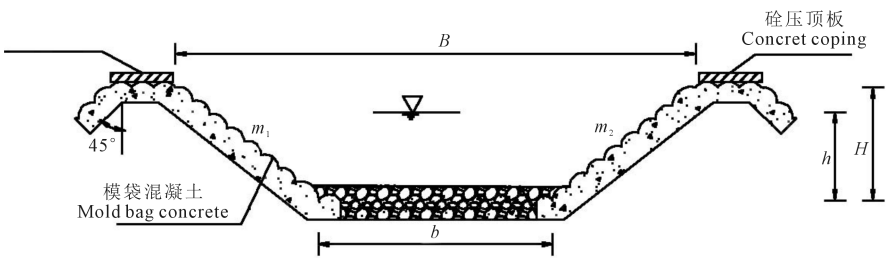
面,渠道两边坡铺设 15 cm 厚模袋混凝土防渗衬砌,混凝土强度等级为 C25、抗冻等级为 F200、抗渗等级为 W6,底部为经平整后的砂砾石。建设二分干渠试验渠段(1+910~3+040)长度 1.130 km。

测流断面尺寸及断面水力参数见表 1,断面结构见图 1。

表 1　测流断面尺寸及水力参数表

Table 1　The dimension and hydraulic parameters of the measuring flow section

渠道名称 Channel name	测量断面 Measuring section	桩号 Pile number	渠底高程 Bottom elevation /m	渠深/m Ditch depth	渠口宽/m Channel width	设计水深/m Design water depth	渠底宽/m Bottom width of canal	边坡系数(逆水流) Slope coefficient (reverse flow)	测段长度/m Channel length	渠底比降 Water surface slope
什巴分干渠 Shiba sub canal	上断面 Upper section	0+200	1028.889	2.60	20.72	1.9	13.20	左 Left 1∶1.73 右 Right 1∶1.85	2016	1/5873
	下断面 Lower section	2+216	1028.480	2.60	21.88	1.9	14.4	左 Left 1∶1.76 右 Right 1∶1.8		
建设二分干渠 Jianshe sub canal	上断面 Upper section	1+910	1040.192	2.50	14.80	1.83	8.8	左 Left 1∶1.5 右 Right 1∶1.61	1130	1/4132
	下断面 Lower section	3+040	1039.918	2.50	14.29	1.83	8.0	左 Left 1∶1.58 右 Right 1∶1.68		



H:渠深(m);h:设计水深(m);B:渠口宽(m);b:渠底宽(m);m_1:右岸边坡系数;m_2:左岸边坡系数

H:Ditch depth(m);h:Design water depth(m);B:Channel width bottom(m);b:Width of canal slope(m);m_1:Coefficient of right bank;m_2:Slope coefficient of left bank

图 1　渠道测流断面结构示意图

Fig.1　Channel flow measurement schematic cross-sectional structure

1.3　观测内容及方法

结合试验渠段断面形式和衬砌结构,现场测量内容包括渠道断面尺寸、断面水深、断面流量等。渠道断面尺寸采用钢卷尺和水准仪测量;渠底高程测量采用精度为 1 mm 的 DS1 型水准仪;流量采用测速范围在 0.2~3.5 m·s^{-1},精度为 1.5%的 SL68 型旋杯式流速仪测量平均流速,计算出断面流量。流速采用精测法测量[16],在观测断面上布设 7 条测线,根据水深情况确定垂线上测点个数,用面积-流速法处理测定结果,即用流速仪分别测出由测速垂线分隔的若干部分面积的部分平均流速,然后乘以部分过水断面面积,求得该部分流量,再计算其代数和得出断面流量,由断面流量与过水断面总面积求得断面平均流速;水深用精密水准仪和精度为 1 mm 的水尺测量。流量和水深测量时结合灌区灌溉用水情况,什巴分干渠测试时间为 2017 年 10 月 19 日—10 月 28 日,水温为 3℃;建设二分干渠测试时间为 2017 年 10 月 29 日—11 月 4 日,水温为 2℃。每组数据上下游断面同时测量。

2　结果与分析

2.1　糙率系数计算公式

测定渠段水流假定为恒定非均匀流,渠道上下游断面能量守恒,其基本公式为:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h = \frac{v_2^2}{2g} + h_w \tag{1}$$

其中

$$h_w = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{8g}{c^2} \tag{3}$$

$$c = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{b} \tag{4}$$

由(1) ~ (4) 式可得,恒定非均匀流渠道糙率

系数的计算公式为：

$$n = \frac{\overline{AR^{\frac{2}{3}}}}{Q}\sqrt{i + \frac{h_1 - h_2}{L} + \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}\right)\frac{Q^2}{2gL}} \quad (5)$$

式中，n 为渠道糙率系数；Q 为流量；h_1 为上断面水深，h_2 为下断面水深；A_1 为上断面面积，A_2 为下断面面积；L 为渠道长度，g 为重力加速度，i 为底坡。

其中

$$\frac{\overline{AR^{\frac{2}{3}}}}{Q} = \frac{A_1 R_1^{\frac{2}{3}} + A_2 R_2^{\frac{2}{3}}}{2} \quad (6)$$

2.2 原型观测结果

根据观测渠段断面尺寸、什巴分干渠测得的水深与流量，利用式(5) 就可以计算出观测渠道的糙率系数。原型观测数据及糙率系数计算结果见表 2。

由表 2 可得，什巴分干渠糙率系数最大值为 0.0267，糙率系数最小值为 0.0251，平均值为0.0259。建设二分干渠糙率系数最大值为 0.0279，糙率系数最小值为 0.0264，平均值为 0.0272。什巴分干渠和建设二分干渠模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数范围为 0.0251～0.0279，平均值为 0.0265。

表 2 原型观测数据及糙率系数计算结果

Table 2 Prototype observation data and calculation results of roughness coefficient

渠道 Channel	渠道流量 Flow /($m^3 \cdot s^{-1}$)	渠底坡降 Water surface slope	试验段长度 Length of test section/m	上断面水深 Upper section water depth/m	下断面水深 Lower section water depth/m	上断面面积 Upper sectional area/m^2	下断面面积 Lower sectional area/m^2	糙率 Roughness coefficient
什巴分干渠 Shiba sub canal	15.446 5	0.000 170	2016	1.579	1.548	25.305 7	26.556 6	0.025 1
	16.360 8	0.000 170	2016	1.694	1.666	27.497 4	28.930 9	0.026 7
	17.480 1	0.000 170	2016	1.698	1.666	27.574 5	28.930 9	0.025 1
	17.793 1	0.000 170	2016	1.702	1.657	27.651 7	28.748 1	0.025 2
	17.823 6	0.000 170	2016	1.709	1.638	27.786 8	28.363 0	0.025 9
建设二分干渠 Jianshe sub canal	14.263 2	0.000 242	1130	1.69	1.766	19.313 2	19.211 6	0.026 5
	13.442 4	0.000 242	1130	1.698	1.796	19.425 8	19.625 8	0.027 7
	13.181 1	0.000 242	1130	1.615	1.688	18.267 8	18.148 4	0.026 4
	13.076 9	0.000 242	1130	1.618	1.689	18.309 3	18.161 9	0.026 9
	11.581 2	0.000 242	1130	1.511	1.596	16.847 1	16.920 0	0.026 6
	9.730 8	0.000 242	1130	1.402	1.485	15.394 1	15.474 5	0.027 6
	9.719 9	0.000 242	1130	1.393	1.475	15.275 8	15.346 3	0.027 9

3 糙率系数测定的误差分析

3.1 糙率系数测定误差与水力测量误差的函数关系

在渠道糙率系数原型观测过程中，由于仪器精度及人为操作等问题，测得的流量、水深等水力参数存在一定误差，由此产生的误差会导致测定的糙率系数产生误差。渠道糙率系数试验中，需要测量上、下游断面面积 A_1、A_2，渠底比降 i，渠道长度 L，渠道流量 Q，上下游水深 h_1、h_2 等参数。渠道断面面积、渠底比降、渠道长度采用精密水准仪和钢尺测量，精度高、误差小，对糙率系数测定结果影响较小；流量和水深测量采用 SL68 型旋杯式流速仪和水尺，由于渠道断面流速分布不均，水面波动等影响，流量和水深的测量误差较大，对糙率系数测定结果影响较大。因此，糙率系数原型观测试验结果产生误差的主要影响因素为流量和水深。因此，为了分析模袋混凝土复合衬砌渠道糙率系数测定的误差，建立了观测断面水力 测量误差与渠道糙率误差之间的函数关系。

当测得渠道断面流量与水深时，可以用公式(5)计算渠道的糙率系数。由于流量和水深测量值存在误差，获得的糙率值也存在误差[17]。假设流量测量误差为 ΔQ，上断面水深误差为 Δh_1，下断面水深误差为 Δh_2，则糙率误差的数学描述为：

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial Q}\Delta Q + \frac{\partial n}{\partial h_1}\Delta h_1 + \frac{\partial n}{\partial h_2}\Delta h_2 \quad (7)$$

式中，$\Delta n = n_r - n$，$\Delta h_1 = h_{1r} - h_1$，$\Delta h_2 = h_{2r} - h_2$ 下标 r 为准确值，Q、h_1、h_2 为测量值；$\partial n/\partial Q$、$\partial n/\partial h_1$、$\partial n/\partial h_2$ 是对(5) 式分别求 Q、h_1、h_2 的偏导数。

对(5) 式分别求偏导数可得：

$$\frac{\partial n}{\partial Q} = \frac{n}{Q}\left(-1 + \frac{Q^2 c_1}{2gL c_2^2}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial h_1} = \frac{\partial\left(\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}\right)}{\partial h_1}\frac{c_2}{Q} + \frac{\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}}{2LQ c_2}\left(1 - \frac{Q^2 B_1}{g A_1^3}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial n}{\partial h_2} = \frac{\partial\left(\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}\right)}{\partial h_2}\frac{c_2}{Q} - \frac{\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}}{2LQ c_2}\left(1 - \frac{Q^2 B_2}{g A_2^3}\right) \quad (10)$$

其中：

$$\frac{\partial\left(\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}\right)}{\partial h_1}=\frac{B_1 R_1^{\frac{2}{3}}}{2}+\frac{A_1}{3R_1^{\frac{1}{3}}}\frac{dR_1}{dh_1} \tag{11}$$

$$\frac{\partial\left(\overline{\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{Q}}\right)}{\partial h_2}=\frac{B_2 R_2^{\frac{2}{3}}}{2}+\frac{A_2}{3R_2^{\frac{1}{3}}}\frac{dR_2}{dh_2} \tag{12}$$

$$\frac{dR_1}{dh_1}=\frac{\left[b_1+\left(\sqrt{1+m_{12}^2}+\sqrt{1+m_{12}^2}\right)h_1\right]\times\left[(m_{11}+m_{12})h_1+b_1\right]-\left[\frac{(m_{11}+m_{12})h_1^2}{2}\right]\times\left(\sqrt{1+m_{11}^2}+\sqrt{1+m_{12}^2}\right)}{\left[b_1+\left(\sqrt{1+m_{11}^2}+\sqrt{1+m_{12}^2}\right)h_1\right]^2} \tag{13}$$

$$\frac{dR_2}{dh_2}=\frac{\left[b_2+\left(\sqrt{1+m_{21}^2}+\sqrt{1+m_{22}^2}\right)h_2\right]\times\left[(m_{21}+m_{22})h_2+b_2\right]-\left[\frac{(m_{21}+m_{22})h_2^2}{2}\right]\times\left(\sqrt{1+m_{21}^2}+\sqrt{1+m_{22}^2}\right)}{\left[b_2+\left(\sqrt{1+m_{21}^2}+\sqrt{1+m_{22}^2}\right)h_2\right]^2} \tag{14}$$

$$c_1=\frac{1}{A_1^2}-\frac{1}{A_2^2} \tag{15}$$

$$c_2=\sqrt{i+\frac{h_1-h_2}{L}+c_1\frac{Q^2}{2gL}} \tag{16}$$

将算得的 $\partial n/\partial Q$、$\partial n/\partial h_1$、$\partial n/\partial h_2$ 代入式(7),可得渠道糙率误差。在测量设备误差给定情况下,渠道糙率最大误差是:

$$|\Delta n|_{\max}\leqslant\left|\frac{\partial n}{\partial Q}\Delta Q\right|+\left|\frac{\partial n}{\partial h_1}\Delta h_1\right|+\left|\frac{\partial n}{\partial h_2}\Delta h_2\right| \tag{17}$$

或者

$$|\Delta n|_{\max}\leqslant|\Delta n_Q|+|\Delta n_{h1}|+|\Delta n_{h2}| \tag{18}$$

其中,$\Delta n_Q=(\partial n/\partial Q)\times\Delta Q$ 为糙率的流量测量误差分量,$\Delta n_{h1}=(\partial n/\partial h_1)\times\Delta h_1$ 为糙率的上断面水深测量误差分量,$\Delta n_{h2}=(\partial n/\partial h_2)\times\Delta h_2$ 为糙率的下断面水深测量误差分量。从公式(17)或(18)可以看出,只要已知流量和水深的水力参数测量误差,计算出流量测量误差分量和水深测量误差分量,就可以计算得到渠道糙率系数测定的误差。

3.2　糙率测定误差计算与分析

对什巴分干渠和建设二分干渠试验渠段糙率系数测定值进行误差计算。因为观测流量用的 SL68 型旋杯式流速仪测速范围在 0.2~3.5 m·s^{-1},精度为 1.5%,测水深用的精密水准仪、水尺精度为 1 mm。故分别计算 $\Delta Q/Q=1\%$、$\Delta h=0.5$ mm,$\Delta Q/Q=1.5\%$、$\Delta h=1$ mm 条件下测流断面的测定误差。计算结果见表 3 和表 4,渠道糙率随流量变化的误差曲线图见图 2。

表 3　什巴分干渠、建设二分干渠糙率的误差($\Delta Q/Q=1\%$、$\Delta h=0.5$ mm)

Table 3　The roughness error of the Shiba and Jianshe sub canal ($\Delta Q/Q=1\%$、$\Delta h=0.5$ mm)

渠道 Channel	Q/(m^3·s^{-1})	n	$\frac{\Delta Q}{Q}$/%	Δh/mm	$\frac{\lvert\Delta n_Q\rvert}{n}$/%	$\frac{\lvert\Delta n_{h_1}\rvert}{n}$/%	$\frac{\lvert\Delta n_{h_2}\rvert}{n}$/%	$\lvert\Delta n\rvert_{\max}$	$\frac{\lvert\Delta n\rvert_{\max}}{n}$/%
什巴分干渠 Shiba sub canal	15.446 5	0.025 0	1	0.5	0.647	1.202 4	1.277 0	0.000 637	2.544 1
	16.360 8	0.026 7	1	0.5	0.611	1.124 2	1.194 9	0.000 635	2.380 1
	17.480 1	0.025 1	1	0.5	0.572	1.130 2	1.198 8	0.000 599	2.386 3
	17.793 1	0.025 2	1	0.5	0.562	1.110 1	1.187 1	0.000 594	2.353 5
	17.823 6	0.025 9	1	0.5	0.561	1.066 6	1.090 7	0.000 573	2.213 4
建设二分干 Jianshe sub canal	9.719 9	0.027 9	1	0.5	1.028	1.028 8	1.032 4	0.000 604	2.164 1
	9.730 8	0.027 6	1	0.5	1.027	1.027 7	1.045 9	0.000 600	2.174 2
	11.581 2	0. 026 6	1	0.5	0.864	0.863 5	0.970 6	0.000 534	2.010 0
	13.076 9	0.026 9	1	0.5	0.765	0.764 7	0.919 8	0.000 509	1.892 5
	13.181 1	0.026 6	1	0.5	0.759	0.758 7	0.920 5	0.000 503	1.894 3
	13.442 4	0.027 7	1	0.5	0.744	0.743 9	0.865 1	0.000 497	1.794 4
	14.263 2	0.026 5	1	0.5	0.701	0.663 4	0.828 1	0.000 459	1.733 1

注:Q:断面过水流量;n:糙率系数;$\frac{\lvert\Delta n_Q\rvert}{n}$%:糙率测定的流量误差分量;$\frac{\lvert\Delta n_{h_1}\rvert}{n}$%:糙率测定的上游水深误差分量;$\frac{\lvert\Delta n_{h_2}\rvert}{n}$%:糙率测定的下游水深误差分量;$\lvert\Delta n\rvert_{\max}$:水力测定产生的最大误差;$\frac{\lvert\Delta n\rvert_{\max}}{n}$:水力测定的最大相对误差。下同。

Note: Q: Cross-sectional flow; n: Roughness coefficient; $\frac{\lvert\Delta n_Q\rvert}{n}$%: Error component of roughness calculation; $\frac{\lvert\Delta n_{h_1}\rvert}{n}$%: Error component of upstream water depth roughness calculation; $\frac{\lvert\Delta n_{h_2}\rvert}{n}$%: Error component of roughness calculation of downstream water depth; $\lvert\Delta n\rvert_{\max}$: Maximum error of measurement; $\frac{\lvert\Delta n\rvert_{\max}}{n}$: Maximum relative error of measurement. The same below.

表 4 什巴分干渠、建设二分干渠糙率的误差($\Delta Q/Q=1.5\%$、$\Delta h=1$ mm)

Table 4 The roughness error of the Shiba and Jianshe sub canal($\Delta Q/Q=1.5\%$、$\Delta h=1$ mm)

渠道 Channel	$Q/(m^3\cdot s^{-1})$	n	$\frac{\Delta Q}{Q}/\%$	Δh/mm	$\frac{\lvert\Delta n_Q\rvert}{n}/\%$	$\frac{\lvert\Delta n_{h_1}\rvert}{n}/\%$	$\frac{\lvert\Delta n_{h_2}\rvert}{n}/\%$	$\lvert\Delta n\rvert_{max}$	$\frac{\lvert\Delta n\rvert_{max}}{n}/\%$
什巴分干渠 Shiba sub canal	15.446 5	0.025 0	1.5	1	0.971	2.404 8	2.553 9	0.001 262	5.037 3
	16.360 8	0.026 7	1.5	1	0.917	2.248 4	2.389 7	0.001 257	4.712 7
	17.480 1	0.025 1	1.5	1	0.858	2.340 2	2.397 6	0.001 185	4.724 8
	17.793 1	0.025 2	1.5	1	0.843	2.252 0	2.334 6	0.001 176	4.659 8
	17.823 6	0.025 9	1.5	1	0.841	2.171 7	2.265 9	0.001 134	4.382 4
建设二分干渠 Jianshe sub canal	9.719 9	0.027 9	1.5	1	1.543	2.079 1	2.0577	0.001 196	4.284 9
	9.730 8	0.027 6	1.5	1	1.541	2.091 8	2.051 1	0.001 189	4.305 0
	11.581 2	0. 026 6	1.5	1	1..295	1.941 3	1.906 0	0.001 058	3.979 8
	13.076 9	0.026 9	1.5	1	1.147	1.839 6	1.792 5	0.001 008	3.747 2
	13.181 1	0.026 6	1.5	1	1.138	1.841 0	1.795 8	0.000 996	3.750 7
	13.442 4	0.027 7	1.5	1	1.116	1.730 2	1.709 9	0.000 983	3.553 0
	14.263 2	0.026 5	1.5	1	1.105	1.736 8	1.722 9	0.000 909	3.431 7

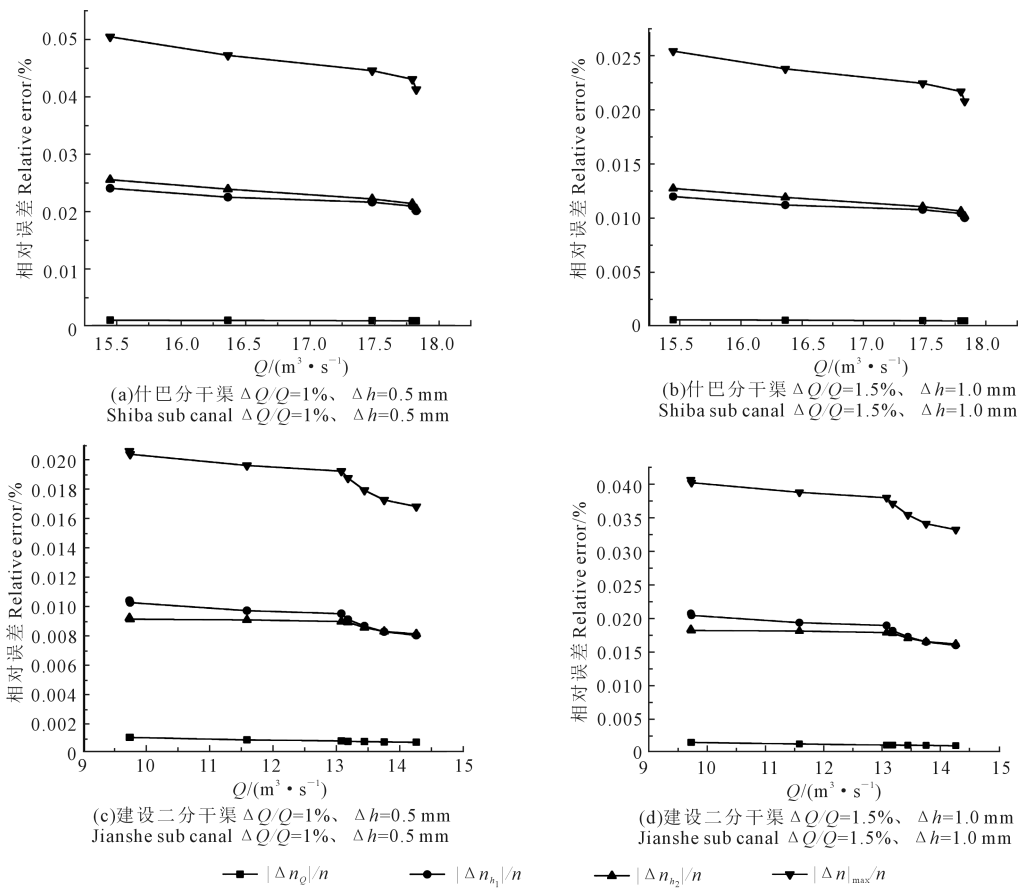


图 2 渠道糙率误差曲线

Fig.2 Error curve of channel roughness

从表 3 和表 4 可以看出,测量水深、流量过程中,微小的水力测量误差可能产生较大的渠道糙率测定误差,经计算,什巴分干渠、建设二分干渠原型观测的糙率误差最大可达 5.037%。由表 3、表 4 和图 2 可以看出,引起渠道糙率误差的关键因素是糙率的水深误差分量$|\Delta n_h|/n$,且上、下游水深误差分量近似相等,即$|\Delta n_{h_1}|/n\approx|\Delta n_{h_2}|/n$,当建设二分干渠的流量为 9.179 9 $m^3\cdot s^{-1}$时,测量误差最大为 1.543%,此时上、下游水深测量误差分别为 2.0791%、2.0577%;当什巴分干渠的流量 15.4465 $m^3\cdot s^{-1}$时,测量误差最大为 0.971%,此时上、下游水深测量误差分别为 2.404 8%、2.553 9%,水深误

差大小近似相等,但均大于流量测量误差,糙率测定的流量误差分量$|\Delta n_Q|/n$很小且稳定,说明本次试验观测流量用的SL68型旋杯式流速仪工作稳定,试验测得的数据准确、可靠。

由图2可看出,最大相对误差近似等于上下游水深测量误差之和,即$|\Delta n|_{max}/n \approx |\Delta n_{h_1}|/n + |\Delta n_{h_2}|/n$,因此,本次试验误差主要来源于测量水深读水尺时产生的误差,且水深误差分量随着过水流量的增大而减小,对同一渠道而言,渠道水深会随着断面流量的增大而增大,随着渠道水深的增大,读水尺产生误差所占比例变小,因此对同一渠道而言,糙率的水深误差分量随着断面流量的增大而减小,最大误差可达2.554%,从而引起的最大绝对误差可达5.037%。因此,建议今后测量时,采用更高精度的水深测量仪器,可有效减小渠道糙率测定误差。

4　结　论

1)对模袋混凝土护坡、砂砾石护底的复合断面衬砌渠道开展了糙率原型观测试验,引水流量为9.7~20 $m^3 \cdot s^{-1}$。现场观测计算了不同流量下什巴分干渠、建设二分干渠模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数范围为0.025 1~0.027 9,平均糙率为0.026 5。

2)通过渠道水力测量误差对渠道糙率测定影响的研究,建立了水力测量误差与渠道糙率误差之间的函数关系,计算分析了什巴分干渠、建设二分干渠实测流量、水深产生的糙率计算误差,计算得到本次原型观测糙率测定最大误差为5.037%。

3)通过误差分析发现,流量测量误差很小,本次试验观测流量用的SL68型旋杯式流速仪工作稳定,试验测得的数据准确、可靠。水深测量误差偏大,最大可达2.254%。最大相对误差近似等于上下游水深测量误差之和,即$|\Delta n|_{max}/n \approx |\Delta n_{h_1}|/n + |\Delta n_{h_2}|/n$,建议以后进行原型观测试验,水深等应采用精度更高的仪器测量,最大化减小测量误差对糙率系数计算的影响。

参 考 文 献:

[1] 安姝.水利工程中的农田灌溉防渗渠道衬砌施工技术[J].中国农业信息,2016,(24):68.

[2] 何武全. 渠道衬砌与防渗工程技术手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015:104-119.

[3] 姚仕明,卢金友.两种护岸新材料的应用技术试验研究[J].泥沙研究,2006,(2):17-21.

[4] 张志满.模袋混凝土施工工艺[J].水运工程,2008,(2):109-113.

[5] 李亚童,申向东,高矗,等.大型灌区现役衬砌模袋混凝土渠道力学性能检验[J].中国农村水利水电,2016,(1):105-108.

[6] 余敏忠,赵春雷,吕东,等.模袋混凝土技术在河套地区水利工程中的应用[J].建筑工程技术与设计,2014, (33):659-659.

[7] 范轴. 模袋混凝土护坡在大泖港上游河道防洪(一期)工程中的应用[J]. 中国水运(下半月),2017, (6):211-214.

[8] 高慧颖.渠道模袋混凝土衬砌的冻害及其预防措施[J].水利水电技术,1994, (12):41-45.

[9] 黄宽渊. 多种糙率渠道的水力计算[J]. 水利水电技术, 1986,(10):44-49.

[10] 张红岐. 河套灌区衬砌渠道综合糙率与渠道冲淤问题研究[D]. 北京:中国农业大学, 2007.

[11] 纪诗闻. 水力因素对明渠糙率影响的三维数值模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2016.

[12] 刘俊发,曲志会,刘鸿涛,等.混凝土衬砌渠道糙率系数估算方法[J].东北水利水电,2011, (9):3-4.

[13] 杨丽,朱启林,孙静,等.北京市南水北调中线工程供水效益评估[J].人民长江,2017, 48(10):44-46.

[14] 孟立敏. 衬砌渠道复合糙率原型观测与分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(12):149-151.

[15] 张建斌, 顾靖超, 陆立国. 宁夏引黄灌区骨干渠道糙率原型观测分析[J]. 水电能源科学, 2017,(7):37-39.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 21303-2017 灌溉渠道系统量水规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.

[17] 杨开林,汪易森. 渠道糙率率定误差分析[J].水利学报,2012, 43(6):639-644.