

许泽林, 宋志强, 燕飞, 等. 基于有机玻璃糙率率定的某渡槽水面线模型试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 201-208.
XU Z L, SONG Z Q, YAN F, et al. Water surface line model test based on roughness rate determination of organic glass in a certain canal[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 201-208. (in Chinese)

基于有机玻璃糙率率定的某渡槽水面线模型试验

许泽林¹, 宋志强¹, 燕飞², 田国栋², 王飞虎¹, 曹成¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710048)

摘要: 采用光滑有机玻璃作为相似材料进行某渡槽水面线模型试验, 发现模型试验测得渡槽最高内水位与均匀流公式计算出的水位相差较大。针对此问题开展模型试验、理论分析和数值模拟研究。分析影响模型试验中渡槽水位的各种因素; 对模型试验所用的光滑有机玻璃材料进行糙率率定, 基于率定试验结果和理论分析, 建立一种糙率比尺不相似情况下的水位修正方法; 开展渡槽水面线的三维有限元数值模拟研究, 在渡槽模型试验实测数据验证数值模拟准确的基础上, 证明针对糙率比尺不相似提出的模型试验渡槽水位修正方法的正确性。结果表明: 试验糙率比尺不相似是导致渡槽实测水位与均匀流计算水位相差较大的关键因素, 光滑有机玻璃板糙率取 0.007 9~0.008 3 较为合适, 糙率值随流量的增大呈现减小的趋势, 随坡度的增大呈现增大趋势。

关键词: 渡槽; 模型试验; 水面线; 有机玻璃; 糙率率定

中图分类号: TV672.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0021

渡槽作为水利工程中不可或缺的交叉输水建筑物, 其稳定运行尤为关键。渡槽良好的过流能力对其高效运行起到了重要作用^[1-4], 而水面线可以直观地反映出渡槽过流能力的强弱。当渡槽输水流量变化时, 其水面线必然会发生相应改变, 而渡槽的糙率系数也会影响水面线的变化。糙率系数作为曼宁公式的一个调节系数并不具有明确的物理意义, 但其大小直接影响着渡槽水位、水流速度等水力学特性, 是水力学上反映水流阻力的一种综合性系数^[5-6]。糙率系数的选取对渡槽设计是否合理起着至关重要的作用: 如果糙率系数过大, 不仅会增加工程投资, 也会引起渡槽渠道冲刷; 如果糙率系数过小, 则达不到设计过水能力, 从而造成渡槽淤积^[7]。

为验证渡槽的过流能力是否满足设计要求, 通常采用水工模型试验进行验证。王才欢等^[8]通过模型试验复演了原型渡槽大流量输水时的超常大波动现象, 分析揭示了渡槽产生超常大波动的成因, 李君等^[9]结合物理模型试验及原型观测, 提出了大

化船闸渡槽过流能力优化的综合改善措施, 较好地解决了复杂的水力学问题, 并得到了工程实践的检验。但对于长距离渡槽, 由于试验场地、经济、模型等条件所限, 一般采用小比尺模型, 从而难以保证模型的糙率相似要求, 导致渡槽的水面线结果有一定误差。因此, 在试验工作中不得不采用一些糙率修正的措施。

此外, 水工模型试验可为数值模拟的准确性提供依据。近年来, 数值模拟主要通过 CFD 技术进行渡槽三维流场分析, 揭示槽内水流的水力学特性, 从而反映渡槽的过流能力^[10-12]。数值模拟也能用来率定模型的糙率系数, Li 等^[13]将渡槽试验得到的实测地形和水力数据作为水流模拟的初始边界条件, 利用 CCHE 三维模型对塔里木河段渡槽的糙率值进行率定, 从而提出了一种渡槽模型糙率系数率定的新方法。Lattice Boltzmann 方法^[14-16]更为渡槽的数值模拟研究提供了新途径, 其在模拟复杂边界条件和多相流方面具有很大优势。模型试验和数值

收稿日期: 2024-07-20 修回日期: 2024-11-14 网络出版时间: 2024-11-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241118.1630.006>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039008); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(52039008); 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(22JJP052)

作者简介: 许泽林(2000—), 男, 山西高平人, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: 731159446@qq.com

通信作者: 宋志强(1981—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士、博士生导师, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: zqsong@xaut.edu.cn

模拟可以相互结合验证,通过混合模型进行研究可提高分析的准确性和效率^[17-20]。

目前,对于坡度较缓且带有弯道的渡槽整体过流能力的研究较少,其各部位水面线变化并不明确,而水工模型试验中常使用的光滑有机玻璃的糙率也未进行准确率定。通过模型试验与数值模拟相结合的方式探究某渡槽的水面线特征,分析其水位变化规律;并通过试验确定光滑有机玻璃糙率,为此类型渡槽平稳输水及水工模型试验提供理论参考。

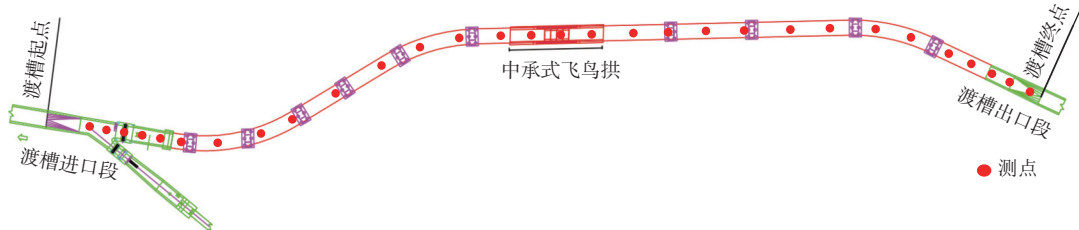


图 1 渡槽平面布置
Fig. 1 Aqueduct floor plan

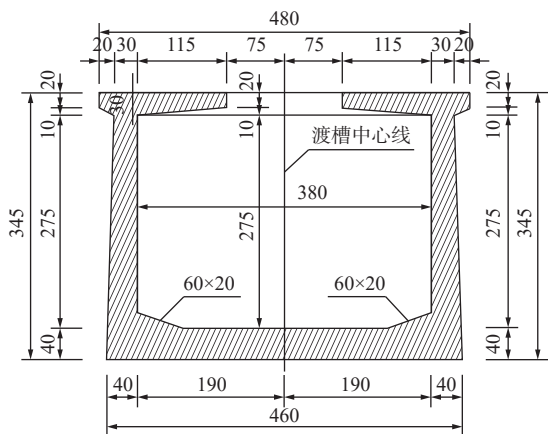


图 2 渡槽断面(单位:cm)
Fig. 2 Cross-sectional view of the aqueduct

1 渡槽模型试验及水面线分析

1.1 模型及测试方案

原型渡槽由进口段、槽身段和出口段 3 部分组成,全长 2 350 m,坡度仅为 1/1 390,包括预应力混凝土简支槽箱及中承式飞鸟拱桥组成。渡槽平面布置见图 1,渡槽断面见图 2,设计流量为 18 m³/s。渡槽模型全程采用光滑有机玻璃制作,按重力相似准则进行设计,模型几何比尺为 1 : 40。

1.2 模型试验水位结果

试验设计 18、15、12、9 和 6 m³/s 共 5 个流量工况。共布置 30 个测点测量渡槽进口段、槽身段和出口段沿程水深,测点位置见图 1。其中,1~5 号测点位于进口段,6~27 号测点位于槽身段,7、12、13、24、25 号测点位于弯道部位,28~30 号测点位于出口段。不同部位沿程水深测量情况见表 1,表中测点标号用 C 代替,数据已转化为原型渡槽水位,测量值均为测点所在断面处的平均水深。

表 1 不同部位水深测量

Tab. 1 Water depth measurement table for different parts

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	进口段水位/m					槽身段水位/m									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
18	3.76	3.72	3.68	3.68	3.36	2.91	2.91	2.9	2.9	2.88	2.88	2.86	2.86	2.84	2.81
15	3.48	3.44	3.38	3.36	3.00	2.56	2.56	2.47	2.47	2.44	2.44	2.42	2.40	2.40	2.38
12	3.08	3.03	3.02	3.02	2.82	2.36	2.36	2.31	2.31	2.30	2.26	2.21	2.19	2.17	2.15
9	2.74	2.68	2.64	2.6	2.42	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	1.87	1.84
6	2.24	2.23	2.15	2.16	1.79	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.37	1.36
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	槽身段水位/m										出口段水位/m				
	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
18	2.8	2.76	2.73	2.70	2.64	2.60	2.58	2.56	2.54	2.53	2.50	2.50	2.77	3.68	3.75
15	2.38	2.36	2.33	2.31	2.31	2.28	2.26	2.25	2.21	2.21	2.16	2.16	2.49	3.35	3.41
12	2.15	2.14	2.12	2.11	2.08	2.07	2.07	2.02	1.97	1.9	1.83	1.72	2.18	2.89	2.92
9	1.84	1.82	1.82	1.80	1.79	1.73	1.73	1.67	1.64	1.62	1.54	1.46	1.37	2.35	2.39
6	1.36	1.34	1.33	1.33	1.32	1.31	1.29	1.24	1.22	1.13	1.12	1.09	1.04	1.90	1.99

1.3 渡槽水位的理论计算

直段渡槽内水流可视为明渠均匀流,明渠均匀流计算公式^[21]为

$$Q = Bh_0 C \sqrt{Ri} \quad (1)$$

式中: Q 为过水流量, m^3/s ; B 为渠道底宽, m ; R 为水力半径, m ; h_0 为正常水深, m ; 在明渠均匀流中,水力坡降等于渠底纵坡 i ; 谢才系数 C 使用曼宁公式计算。曼宁公式^[21]为

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

式中: n 为过流壁面糙率, 取 0.013 5; 渡槽底宽 B 为 3.80 m ; 渠底坡度 i 为 0.000 719 4。不同流量下渡槽原型均匀流水深见表 2。

表 2 均匀流水深计算
Tab. 2 Uniform flow depth calculation

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	18	15	12	9	6
均匀流水深/ m	2.317	2.016	1.706	1.383	1.037
临界水深/ m	1.318	1.167	1.006	0.830	0.634

由计算结果可知, 均匀流水深大于临界水深, 而槽身段首端实测控制水深大于均匀流水深, 故水面曲线为: 缓坡渠道上的 a_1 型壅水曲线。槽身段前半部分由于弯道影响流态, 此部分水流不可视为均匀流, 弯道之后水流会逐渐过渡到均匀流流态。将 14~23 号测点水位与均匀流水深对比, 可以得出此部分槽身段水位均高于均匀流水位。造成此结果影响最大的因素可能有 3 个: 弯道影响流态, 导致水位壅高; 糙率比尺不相似, 模型糙率偏大, 导致水头损失加大, 进而导致水位升高^[22]; 均匀流计算公式是矩形断面所得水位, 而渡槽实际断面过水面积减小, 从而造成水位升高^[23-24]。



图 3 渠道和量水堰模型
Fig. 3 Channel and weir modeling

试验拟定了 4 个比降, 即陡坡 1.0%、0.5%、临界坡 0.305 3% 和原渡槽模型坡度 1/1 390, 渠道底宽为 0.19 m , 每个坡度量测 18、15、12、9 m^3/s 这 4 个渡槽原型流量工况。通过多次量取 4 个坡度不同工况的均匀流正常水深与平均流速, 由此计算出模

试验过程中, 弯道水流有不同于直段水流的特殊现象。受离心惯性力的影响, 凹壁面附近水位高于凸壁面附近水位, 即出现横向水面坡度, 各过水断面横比降大小不相等, 曲率半径越小, 横向水面坡降越大, 两壁面的水面高差也越大。弯道的横向水面坡度会影响下游流态, 因为断面纵向最大流速在进入弯道之前就离开了它的正常位置, 偏向弯道凸壁面, 出弯道后会继续向弯道外侧发展, 经过相当长距离后才能恢复正常位置, 导致下游水位加高。

当过流流量为 18 m^3/s 时, 以试验进口实测水位为起始水位使用公式推求槽身无弯道时的水面线。计算对比后发现实测水位在弯道处比计算出的水面线高 8~10 cm , 弯道之后随距离增加水位升高逐渐减小, 最终与计算水位一致。当渡槽断面为矩形断面时, 由于断面面积增大, 水位必定会降低, 通过下文试验测量出渡槽原型断面与矩形断面水位差值。

除去弯道及断面影响实测水位与均匀流计算水位相差还是很大, 表明试验糙率比尺不相似是导致渡槽实测水位与均匀流计算水位相差较大的关键因素。由于缺少明确的模型材料糙率参数, 故通过率定试验对光滑有机玻璃的糙率进行率定。

2 有机玻璃糙率率定

取渡槽模型中任意长 10 m 的一个直段进行模拟, 渠道断面为矩形断面, 几何比尺在渡槽模型比尺基础上放大一倍即 1 : 20。利用抽水泵输水到进水箱, 流经渠道后进入量水堰量取流量, 以此构成循环。通过脚手架平台控制渠道坡度。渠道和量水堰实体模型见图 3。

型糙率。再由此糙率验证原模型坡度水深的准确性。不同坡度矩形断面模型糙率的计算结果见表 3。

由以上数据可得, 光滑有机玻璃糙率约为 0.007 9~0.008 3, 平均糙率约为 0.008 1。图 4 为糙率随流量与坡度的变化关系, 分析可知糙率系数 n 并非单

纯反映壁面粗糙状况的系数,还受到水力要素和水流特性的影响,是一个综合的水力系数。随着流量增大,糙率系数会呈现出相应减小趋势,这是因为随着流量增大,断面平均流速增大,水流的雷诺数也会相应增大。但水流流速增大的速率要大于水

力半径增大的速率,由谢才-曼宁公式可知,流速对糙率系数的影响要大于水力半径,因此糙率系数会减小。而随着坡度增大,糙率系数会呈现出增大趋势,这是因为坡度增大,相应流速增大,水头损失增大,从而反映出糙率系数变大。

表 3 不同坡度模型糙率计算结果
Tab. 3 Calculation results of roughness of different slope models

坡度	1.0%(陡坡)				0.5%(陡坡)			
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	18	15	12	9	18	15	12	9
均匀流水深/m	0.043 9	0.039 0	0.033 8	0.028 2	0.055 7	0.049 3	0.042 6	0.035 5
平均流速/(m·s ⁻¹)	1.206 3	1.131 6	1.044 5	0.939 0	0.950 8	0.895 2	0.828 8	0.745 9
糙率	0.008 008	0.008 080	0.008 170	0.008 297	0.007 975	0.008 037	0.008 13	0.008 287

坡度	0.305 3%(临界坡)				1/1 390(渡槽坡度)			
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	18	15	12	9	18	15	12	9
均匀流水深/m	0.066 2	0.058 5	0.050 4	0.041 8	0.112 7	0.09 9	0.084 5	0.069 2
平均流速/(m·s ⁻¹)	0.799 8	0.754 4	0.700 5	0.633 5	0.469 9	0.445 8	0.417 8	0.382 6
糙率	0.007 945	0.008 016	0.008 104	0.008 239	0.007 906	0.008 0	0.008 088	0.008 204

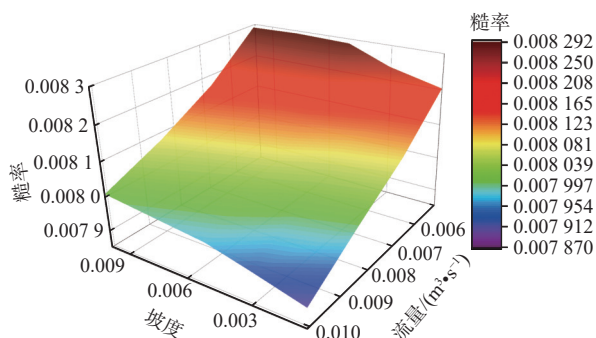


图 4 糙率随流量与坡度的变化关系
Fig. 4 Relationship between roughness and changes in flow rate and slope

渡槽原型糙率约为 0.012~0.014,由相似比尺可知模型要求糙率约为 0.006 5~0.007 5。根据有机玻璃糙率率定结果知模型糙率约为 0.007 9~0.008 3,比模型要求糙率明显偏大,增大了水流的水头损失,故实测水位也是偏大的。需对模型试验值按糙率差值进行修正^[25-26],才能得到不同过流流量下准确的渡槽水位。

将试验模型矩形渠道断面调整为渡槽原型断面形状,坡度调整为原型比降 1/1 390 后,此时模型水位比矩形断面水位高 2~3 mm,换算到渡槽原型为 4~6 cm。

3 水位修正

用不同流量下糙率率定值对渡槽模型试验数据修正过程如下。

根据明渠均匀流计算公式及谢才公式^[21]可得:

$$Q = Bh_0 n^{-1} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

将试验水位记为 h_1 ,修正后水位记为 h_2 ,因过流量相等,可得:

$$Bh_1 n_1^{-1} R_1^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} = Bh_2 n_2^{-1} R_2^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

将表 1 中不同流量下每个测点水位 h_1 、试验率定出的糙率值 n_1 、按模型比尺换算后的渡槽原型糙率 n_2 以及不同水位下相应的水力半径 R_1 、 R_2 代入式 (4),用 MATLAB 软件进行迭代求解可得不同测点糙率修正后水位 h_2 ,结果见表 4。图 5 为修正后水位、试验实测水位和均匀流计算水位对比,从图中可以看出,不同流量工况下渡槽弯道后一段距离的修正后水位在逐渐接近均匀流计算水位,此时流态正在向均匀流恢复,流量越大时,实测水位与修正后水位差值越大。对实测水位值与修正后水位值进行数据分析,计算其相对误差与均差,结果见图 6,从图中可以看出过水流量越小时误差值越大,表明流量越小时糙率系数对水位的影响越大。

4 数值模拟

采用 Fluent 软件构建渡槽物理输水模型,在数学模型中,水流控制方程采用三维雷诺时均的 N-S 方程,湍流模型选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型。为了更精确地揭示复杂的流动形态,自由水面采用 VOF 法进行追踪^[27-28]。根据进/出口几何区域复杂的特点,采用分

区对接网格方案。对于水流变化较大、水力特性复杂的关键区域,采用局部加密的小尺寸网格方案。对于引水隧洞顺直段等区域,则采用渐变网格,同时采用并行处理,在保证计算精度的基础上,一方面适应几何形状的变化,另一方面节约计算时间,提高计算效率。图 7 为渡槽进口段模型。

表 4 不同部位水深量测(修正值)

Tab. 4 Water depth measurement table for different parts (corrected values)															
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	进口段水位/m					槽身段水位/m									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
18	3.49	3.45	3.42	3.42	3.12	2.70	2.70	2.69	2.69	2.67	2.67	2.66	2.66	2.64	2.61
15	3.21	3.17	3.11	3.09	2.76	2.36	2.36	2.28	2.28	2.25	2.25	2.23	2.21	2.21	2.19
12	2.82	2.77	2.76	2.76	2.58	2.16	2.16	2.11	2.11	2.10	2.07	2.02	2.00	1.99	1.97
9	2.49	2.43	2.40	2.36	2.20	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.71	1.71	1.71	1.70	1.67
6	2.02	2.01	1.94	1.95	1.61	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	槽身段水位/m										出口段水位/m				
	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
18	2.60	2.56	2.53	2.51	2.45	2.41	2.40	2.38	2.36	2.35	2.32	2.32	2.57	3.42	3.48
15	2.19	2.18	2.15	2.13	2.13	2.10	2.08	2.07	2.04	2.04	1.99	1.99	2.29	3.09	3.14
12	1.97	1.96	1.94	1.93	1.90	1.89	1.89	1.85	1.80	1.74	1.67	1.57	1.99	2.64	2.67
9	1.67	1.65	1.65	1.63	1.63	1.57	1.57	1.52	1.49	1.47	1.40	1.33	1.24	2.13	2.17
6	1.23	1.21	1.20	1.20	1.19	1.18	1.16	1.12	1.10	1.02	1.01	0.98	0.94	1.71	1.79

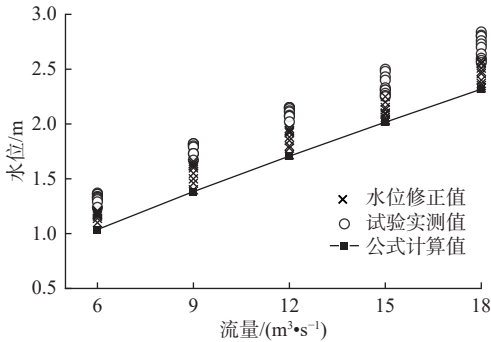


图 5 修正值实测值和计算值对比

Fig. 5 Comparison of measured values and calculated values with correction values

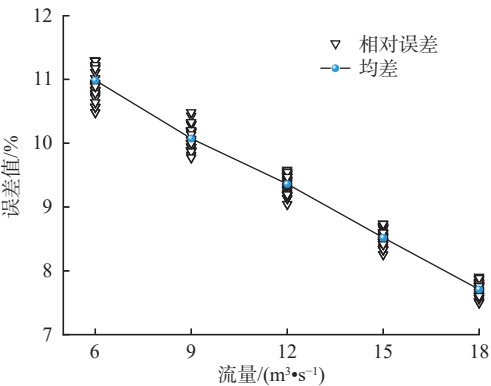


图 6 水位修正前后误差对比

Fig. 6 Comparison of error before and after water level correction

壁面糙率设置为率定出的光滑有机玻璃糙率 0.007 9~0.008 3, 以过流流量 18 m³/s 为例, 糙率选取 0.008, 模拟后水面线与模型实测水面线对比见

图 8, 图中两者水面线基本重合, 表明数值模型正确。将壁面糙率调整为按模型比尺换算后的渡槽原型糙率 0.006 5~0.007 5 再次进行模拟, 以过流流量 18 m³/s 为例, 糙率选取 0.007, 模拟后水面线与上文修正后水面线对比结果见图 8, 图中两者水面线基本接近, 表明本文所用的糙率修正方法是可行的。

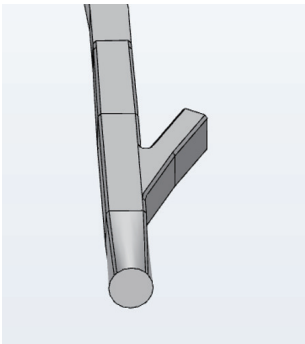


图 7 渡槽模型进口段

Fig. 7 Model inlet section of the aqueduct

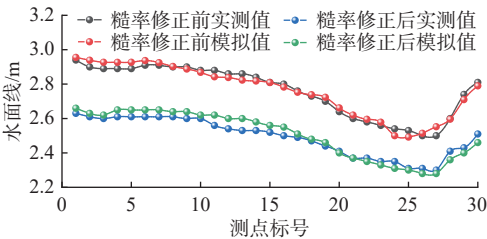


图 8 糙率修正前后实测与模拟水面线对比

Fig. 8 Comparison of measured and simulated water surface lines before and after roughness correction

5 结论

本文以 1 : 40 的几何比尺对某渡槽进行了水力特性模型试验, 试验结果与均匀流计算水深对比后发现实测水位偏大, 对此进行了一系列因素的分析, 并通过另外的试验对光滑有机玻璃进行了糙率率定, 以此糙率对实测水位进行了修正, 最后建立三维有限元数值模型对渡槽水力特性进行模拟, 得到以下结论:

渡槽弯道处实测水位比直段时高 8~10 cm, 弯道之后随距离增加水位升高逐渐减小, 最终与计算水位一致, 此时弯道不再对水位产生影响; 渡槽设计断面水位比矩形断面水位高 4~6 cm; 试验糙率比尺不相似是导致渡槽实测水位与均匀流计算水位相差过大的关键因素。

糙率系数并非是一个单纯反映壁面粗糙状况的系数, 还受到水力要素和水流特性的影响。光滑有机玻璃板的糙率约为 0.007 9~0.008 3, 数值随流量的增大呈现减小的趋势, 随坡度的增大呈现增大趋势。

建立了渡槽三维有限元数值模型, 以试验数据验证了数值模型的准确性。建立了一种模型试验时糙率比尺不相似下水位的修正方法, 并用数值模型验证了修正方法的准确性, 可为同类型水工模型试验提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张建华, 李静, 林潮宁, 等. U 型渡槽参数化有限元建模与智能优化设计研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50(5): 75-81. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.010.
- [2] 郭英. 引汉济渭南干线明渠非恒定流的水力响应研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000682.
- [3] KEENAN D-JONES, MOTTA D, GARCIA M H, et al. Travertine crystal growth ripples record the hydraulic history of ancient Rome's Anio Novus aqueduct [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1239. DOI: 10.1038/s41598-022-05158-2.
- [4] REN S L, LIU P Q. Numerical study on adjustment of the main flow field with guide vanes in transition zone for an S-duct [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(2): 16878140211073420. DOI: 10.1177/16878140211073420.
- [5] ZHANG L L, ZHANG S T, HUANG H P. Study on the resistance characteristics of layered vegetation to overland flow [J]. Ecohydrology, 2024, 17(2): e2621. DOI: 10.1002/eco.2621.
- [6] 郭永鑫, 郭新蕾, 杨鹏志, 等. 管道水力摩阻系数的敏感性分析 [J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1021-1028. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20181090.
- [7] 周聪颖, 袁磊, 张与馨, 等. 明渠自由跌水水力特性及其在流量计量上的应用 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55(5): 106-114.
- [8] 王才欢, 王伟, 侯冬梅, 等. 大型输水渡槽水流超常波动成因分析与对策 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 46-52. DOI: 10.11988/ckyyb.20200406.
- [9] 李君, 洪娟, 胡亚安. 大化船闸渡槽水力特性及水流条件改善措施 [J]. 水利水电工程学报, 2015(3): 101-107. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2015.03.015.
- [10] 徐存东, 訾亚辉, 黄嵩, 等. 基于 Mike21 的圩区河网水动力调控方法研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023, 54(7): 161-170. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.07.014.
- [11] JIN L P, ZHANG C H, ENGEL B A, et al. Hydraulic characteristics and flow measurement performance analysis of portable fish-shaped flumes in U-shaped channels [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 90: 102327. DOI: 10.1016/J.flowmeasinst.2023.102327.
- [12] MENTES A, GALIATSATOU P, SPYROU D, et al. Hydraulic simulation and analysis of an urban center's aqueducts using emergency scenarios for network operation: The case of Thessaloniki City in Greece [J]. Water, 2020, 12(6): 1627. DOI: 10.3390/w12061627.
- [13] LI Y J, GENG Y X, MAO L. Calibration method for Manning's roughness coefficient for a river flume model [J]. Water Supply, 2020, 20(8): 3597-3603. DOI: 10.2166/ws.2020.235.
- [14] WANG S Y, ZHUO J L, JIA F C, et al. Simulation of pollutant diffusion in vegetation open channel based on LBM-CA method [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(27): 71252-71269. DOI: 10.1007/s11356-023-27359-6.
- [15] HADDACH A, SMAOUI H, RADI B. The study of coastal flows based on lattice Boltzmann method: Application Oualidia lagoon [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(4): 225. DOI: 10.1007/s40430-024-04812-2.
- [16] YANG Z H, BAI F P, HUAI W X, et al. Lattice Boltzmann method for simulating flows in open-channel with partial emergent rigid vegetation cover [J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(4): 717-724. DOI: 10.1007/s42241-018-0157-8.
- [17] 胡靖宇, 樊梦洒, 冀荣贤, 等. 大型输水渠跨渠桥梁

- 墩柱导流罩及现场试验研究 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(6): 1194-1203. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0118.
- [18] 王海波, 李春雷, 张昆航. U形渡槽内水体液面晃动对流作用试验研究 [J]. *水利学报*, 2020, 51(12): 1453-1461. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200390.
- [19] 薛海, 刘培, 王鹏涛, 等. 典型双孔渡槽复杂流态的改善研究 [J]. *水利水运工程学报*, 2023(5): 17-25. DOI: 10.12170/20220907001.
- [20] 黄宇航, 周晓泉, 周文桐, 等. 曼宁公式在粗糙壁面明渠流的适用性研究 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(3): 22-29. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2023.03.004.
- [21] 张志昌, 李国栋, 李治勤. 水力学: 上册 [M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [22] 王涛, 郭新蕾, 李甲振, 等. 河道糙率和桥墩壅水对宽浅河道行洪能力影响的研究 [J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 175-183. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180024.
- [23] SUN B, YANG L, ZHU S, et al. Study on the applicability of four flumes in small rectangular channels [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 80: 101967. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101967.
- [24] QIU C L, LIU S H, HUANG J S, et al. Influence of cross-sectional shape on flow capacity of open channels [J]. *Water*, 2023, 15(10): 1877. DOI: 10.3390/w15101877.
- [25] 龚科, 李学海, 王世奎, 等. 导流隧洞泄流能力预测偏差影响因素分析 [J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(10): 147-150. DOI: 10.11988/ckyyb.20220549.
- [26] 余远浩, 张根广, 李安斌, 等. 长距离分洪隧洞输水模型试验相似性研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(4): 143-148. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.19.
- [27] 曾诚, 尹雨然, 陈辰, 等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(2): 9-15. DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2023.02.002.
- [28] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(4): 347-353. DOI: 10.3876/j.issn.1000-980.2020.04.009.

Water surface line model test based on roughness rate determination of organic glass in a certain canal

XU Zelin¹, SONG Zhiqiang¹, YAN Fei², TIAN Guodong², WANG Feihu¹, CAO Cheng¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: To address the issue of variations in normal water levels across different segments during the operational phase of the canal characterized by a gentle slope and curved trajectory, a smooth organic glass material was utilized to simulate the water surface line in model tests conducted on the canal. The experimental approach adopted a normal distribution model and was formulated on the basis of gravity similarity principles, employing a geometric scale ratio of 1:40.

The outcomes of the experiment indicated a notable disparity between the water levels recorded in the flume model test and those calculated using the uniform flow formula. Specifically, the measured water level surpassed the calculated water level, prompting an investigation into the underlying causes of the elevated measured water level and the attainment of precise water level estimations within the spillway. This study employed a tripartite methodology encompassing model tests, theoretical analysis, and numerical simulations.

The analysis of various factors influencing water levels in the aqueduct model test revealed several key aspects. Firstly, the curvature of the aqueduct impacted the flow pattern, resulting in elevated water levels. Secondly, discrepancies in roughness ratio scales were observed, with the model's roughness being excessive, leading to heightened head loss and subsequently increased water levels. Lastly, the discrepancy between the actual aqueduct section, which featured a reduced water area, and the rectangular section utilized in the uniform flow calculation formula contributed to the rise in water levels.

Subsequent roughness determination tests were conducted on the smooth organic glass material utilized in the model test, and the obtained roughness data were scrutinized. A water level correction method was later devised based on the calibration test results and the uniform flow calculation formula to rectify situations where roughness

ratio scales were contradictory, thereby correcting the measured water levels.

Furthermore, a three-dimensional finite element numerical simulation study was conducted to analyze the water surface line of the flume. The accuracy of the numerical simulation was verified against the data obtained from the flume model test, affirming the efficacy of the proposed water level correction method for addressing dissimilar roughness ratio scales.

The study revealed that the water level at the bend of the fishway was 8-10 centimeters higher than that of the straight section. As the distance from the bend increased, the water level gradually decreased until it aligned with the calculated water level, indicating that the bend no longer influenced the water level. Additionally, the water level of the aqueduct's cross section design was 4-6 centimeters higher than that of a rectangular cross section. The primary factor contributing to the substantial disparity between the measured water level in the aqueduct and the calculated water level for uniform flow was the dissimilarity in roughness ratio scales. The roughness coefficient was not merely indicative of wall surface roughness, but was also influenced by hydraulic factors and water flow characteristics. The surface roughness of the polished organic glass plate ranged from 0.007 9 to 0.008 3. The data indicated a decline in roughness as flow rate rises, and conversely, an increase in roughness with steeper slopes.

Key words: aqueduct; model test; waterline; organic glass; roughness rate determination



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部