



靖乐渠渠首沉沙池数值模拟及处理效率

钟小彦¹, 张春燕¹, 邓颜辉¹, 张 犀^{2,3}, 贺大川⁴, 王 科^{2,3}

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 大连理工大学, 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

4. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 甘肃省靖远县靖乐渠由乌兰镇陆家嘴黄河南岸引水, 实灌面积 33.53 km², 距今已有 500 余年历史。黄河水挟沙量大, 致使下游河道和倒虹吸淤积严重。针对这一问题, 拟将原取水口上移 3 km, 沉沙后引水入城。通过建立沉沙池数学模型, 结合引水流量、含沙量、泥沙颗粒级配等多方面因素, 对沉沙池沉沙效率、全年淤积厚度及流场分布进行研究, 并对两种进口形式的沉沙池方案进行对比分析。结果表明, 运用 MIKE21 泥沙输运模型计算是可行的; 沉沙池进口较窄时比方形进口的沉积效果好, 流场分布较好, 口门处不易堵塞。

关键词: 靖乐渠; 沉沙池; 沉沙效率

中图分类号: TV 146

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0286-05

Numerical simulation and treatment efficiency of sedimentation basin at head of the Jingle Canal

ZHONG Xiao-yan¹, ZHANG Chun-yan¹, DENG Yan-hui¹, ZHANG Xi^{2,3}, HE Da-chuan⁴, WANG Ke^{2,3}

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

4. School of Water Conservancy Engineering, Faculty of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The Jingle Canal in Jingyuan County of Gansu Province is diverted from the south bank of the Yellow River in Lujiazui of Wulan Town with an actual irrigation area of 33.53 km², with a history of more than 500 years. The Yellow River has a large amount of sediment carried by water, causing serious siltation in the downstream river course and inverted siphon. Aiming at this problem, we plan to move the original water intake up to 3 km, and divert water into the city after sand settles. Through the establishment of a sedimentation basin mathematical model, we combine with the various factors such as water flow, sediment content, and sediment particle gradation, research the sedimentation efficiency, annual sedimentation thickness and flow field distribution of the sedimentation basin, and compare and analyze two types of entrance sedimentation basin schemes. The results show that it is feasible for the calculation of the MIKE21 sediment transport model. The sedimentation effect of the narrow entrance of the sedimentation basin is better than that of the square entrance, flow field distribution is better, and the entrance door is not easy for blockage.

Keyword: the Jingle Canal; sedimentation basin; sedimentation efficiency

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 钟小彦(1984—), 女, 硕士, 工程师, 从事水利水电工程规划设计。

1 工程概况

靖乐渠自流灌区位于靖远县的乌兰镇、东湾镇, 为靖远县八大自流灌区之首, 是甘肃省最古老的自流灌溉工程之一。靖乐渠始建于明朝正统十四年(公元 1449 年), 距今已有 500 余年的历史, 由乌兰镇陆家嘴黄河南岸引水, 流经乌兰镇、东湾镇, 至东湾镇红柳村长滩尾注入黄河。设计灌溉面积 40 km², 实灌面积 33.53 km², 其中自流灌溉面积 11.33 km², 提灌面积 22.20 km²。靖乐渠设计流量 7.6 m³/s, 年取水量 3 423 万 m³[1]。

靖乐渠是贯穿靖远县城东西的主要水系, 除了是灌溉农田的主要渠系, 也是构成靖远县城景观系统的水景轴线。现状取水口位于黄河南岸, 自流水, 无沉沙设施, 黄河水挟沙量大, 致使下游倒虹吸淤堵严重, 河道淤积严重, 给水系运行带来诸多问题。

针对引水水源黄河含沙量大、水体浊度较高等问题, 将原取水口上移 3 km, 沉沙后引水入城。本文综合考虑引水流量、含沙量、泥沙颗粒级配等多方面因素, 采用条渠沉沙池, 通过数值模拟计算沉沙效率, 最终为沉沙池方案选取提供技术支持。

2 基本参数

新建取水口采用自流式引入黄河水, 配备闸门以控制引水流量, 最大引水流量为 7.6 m³/s。

工程所在黄河河段位于兰州下游, 兰州水文站与安宁渡水文站之间, 祖厉河汇入口上游, 区间没有大的支流汇入。在安宁渡水文站 2010 年的逐月含沙量数据的基础上, 按照泥沙计算典型年的年均含沙量的量级插补得到工程区的逐月含沙量, 作为一般年份的泥沙计算边界条件, 见图 1[2]。

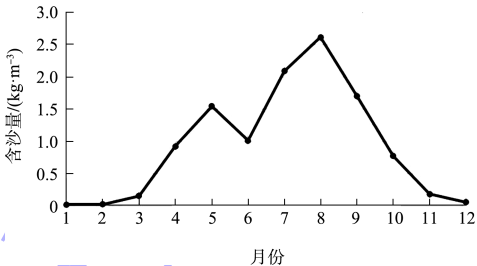


图 1 工程区一般年份逐月含沙量曲线

根据兰州水文站实测资料, 悬移质泥沙级配成果见表 1, 中值粒径为 0.026 mm, 除占比仅 1.7%的特粗颗粒沙(粒径范围 0.1~1 mm)全部沉积外, 本次计算的泥沙颗粒分为两级, 占总质量约 35%的细沙(粒径范围 0~0.01 mm)中值粒径为 0.005 mm; 占总质量约 65%的粗沙(粒径范围 0.01~0.1 mm)中值粒径为 0.045 mm。

表 1 兰州水文站悬移质泥沙级配

粒径 <i>d</i> /mm	0.007	0.010	0.025	0.050	0.10	0.25	0.50	1.0
小于 <i>d</i> 的颗粒质量占比/%	22.3	29.6	49.6	71.1	91.1	98.3	99.8	100.0

3 计算方法

采用 MIKE21 泥沙输运数模模型计算, 泥沙输运控制方程为[3]:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S$$

(1)

式中: $\bar{c}$ 为垂向平均含沙量(kg/m³); x 、 y 分别为空间坐标(m); u 、 v 分别为 x 、 y 方向的垂向平均流速(m/s); h 为水深(m); D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的泥沙紊动扩散系数(m²/s); Q_L 为水平单位面积源项流量(m³·s⁻¹·m⁻²); C_L 为源含沙量(kg/m³); S 为冲淤项(kg·m⁻³·s⁻¹)。

泥沙输运取决于水动力条件, 一般有两种类型的输运: 黏性输运和非黏输运, 通常认为粒径小于 0.06 mm 为黏性输运, 黏性颗粒之间将产生絮凝作用: 当泥沙浓度足够高时, 絮凝体之间的碰撞会增加絮凝体的粒径, 导致更高的沉降速度, 一般认为含沙浓度达到 0.01~10 kg/m³ 为絮凝沉降, 浓度大于 10 kg/m³ 为干扰沉降, 因此本文选择考虑絮凝沉降的全沙模型。粒径大于 0.06 mm 的颗粒可由斯托克斯定律估算沉降速度, 而黏性输运的沉降速度非常依赖絮凝的效率, 在不计干扰沉降的条件下, 絮凝沉降速度可由 Burt 公式定义:

$$w_s=k\left(\frac{c}{\rho}\right)^{\gamma}\quad(c_{\text{hindered}}<c<c_{\text{floc}})\quad(2)$$

式中： c 为体积浓度 (kg/m^3)； c_{floc} 为絮凝的临界浓度 (kg/m^3)； c_{hindered} 为干扰沉降的临界浓度 (kg/m^3)； k 为沉降速度系数； ρ 为泥沙密度 (kg/m^3)； γ 为指数项，通常为 1。

模型计算参数为：细颗粒沉速系数为 0.022 m/s，粗颗粒沉速系数为 0.28 m/s，模拟时间为 4 463.5 h，时间步长为 30 min。

4 沉沙池设计方案

根据《水利水电工程沉沙池设计规范》^[4]，沉沙池可采用定期冲洗式沉沙池、连续冲洗式沉沙池和条渠式沉沙池。定期冲洗式沉沙池的工作特点是沉沙与冲沙不同时进行，根据沉沙池水流的流量、含沙量、澄清度及沉沙池尺寸确定；连续冲洗式沉沙池的工作特点是沉沙、冲沙及供水同时进行，只能清除颗粒较粗的泥沙；平原地势低洼地区或滩涂地带，宜选用条渠沉沙池^[5]。

工程区黄河泥沙颗粒较细，不适用连续冲洗式沉沙池；同时不具备自流排沙条件，不宜采用定期冲洗式沉沙池。综合考虑地形地势、泥沙颗粒级配等多方面因素，采用条渠沉沙池，由进口闸、工作段及出口闸组成。

沉沙池设计规模为长 750 m、宽 460 m，设计水深约 3.22 m。

5 模型验证

通过与黄河上游以往的沉沙池物理模型结果进行对比（计算条件与对比资料一致），对采用的泥沙数学模型加以验证。

沉沙池长 800 m、宽 250 m，引水流量 5.5 m^3/s ，含沙量 2 kg/m^3 ，自流式引入黄河水，闸门控制，泥沙级配见表 1。

经计算，沉沙池 800 m 处的全粒径泥沙沉积率为 69.97%，与资料中的全粒径泥沙沉积率 69.50% 基本一致，见图 2；沉沙池含沙量沿程变化也基本一致，见图 3。说明采用的模型和选取的参数计算沉沙效率是可行的。

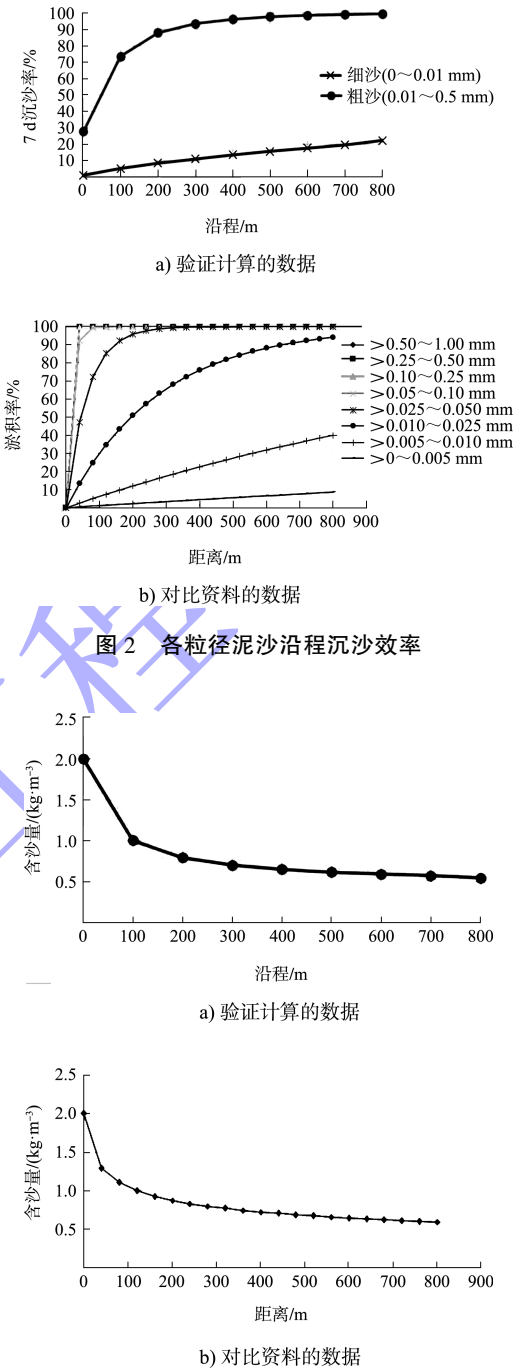


图 2 各粒径泥沙沿程沉沙效率

图 3 沉沙池含沙量沿程变化

6 计算工况及计算条件

本文对拟定的 2 种沉沙池方案进行计算。
1) 方案 1：沉沙池长 750 m、宽 460 m，引水最大流量 7.6 m^3/s ，入口较窄，与走向斜交；
2) 方案 2：沉沙池长 700 m、宽 460 m，引水最大流量 7.6 m^3/s ，入口为方形并垂直走向。

流场边界条件为上游流量入口，下游为沉沙池水位出口。计算网格见图 4。

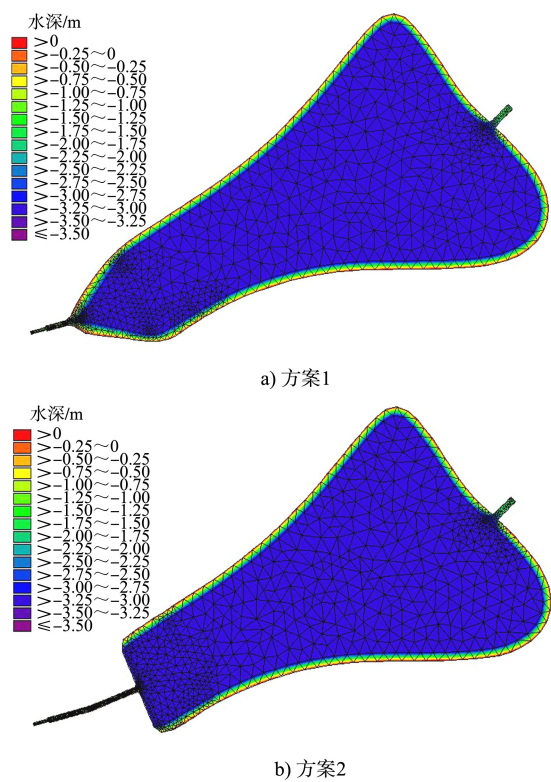


图 4 计算网格

7 计算结果及分析

沉沙池全年平均泥沙沉积率见图 5。可以看出, 2 个方案在沉沙池出口处粗沙(粒径范围 0.01 mm~0.1 mm)的沉积率均大于 95%, 细沙(粒径范围 0~0.01 mm)的沉积率均不足 40%, 即泥沙粒径越大沉积越快, 沉沙池对于大颗粒粗沙的沉积效果较好。粗沙的沉积率在距离沉沙池入口 100 m 范围内均超过 70%, 此后随沿程距离增加沉积率不断增加达到 100%, 即粗沙主要沉积在距离沉沙池入口 100 m 范围内; 而细沙的沉积率在距离沉沙池入口 100 m 范围内仅为 20%, 此后随沿程距离增加沉积率达到近 40%, 即细沙沉积在沉沙池全程较为均匀, 且沉沙率随沿程距离的增加较为明显。

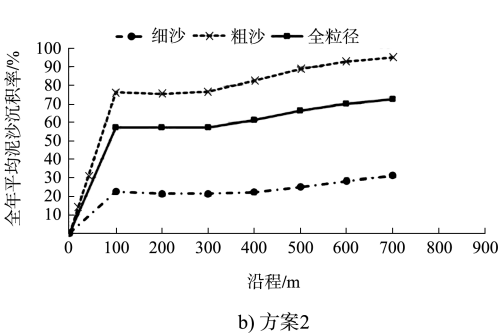
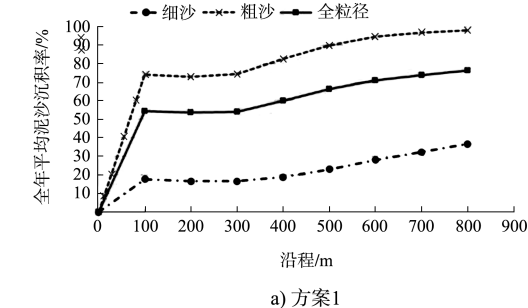


图 5 全年平均泥沙沉积效率

由图 5a) 可知, 方案 1 除占比仅 1.7% 的特粗颗粒沙(粒径范围 0.1~1 mm)全部沉积外, 沉沙池的其他颗粒全粒径沉沙效率约为 73.8%, 即引水中的 73.8% 的泥沙淤积在沉沙池里。8 月份引水含沙量 2.62 kg/m³ 最高时, 通过沉沙池后的水体含沙量降低为 0.60 kg/m³。其中, 占总质量约 65% 的粗沙含沙量为 0.002 kg/m³, 几乎全部沉积; 而占总质量 35% 的细沙含沙量为 0.599 kg/m³, 细沙颗粒极小, 不易沉积, 因此也不会在湿地公园和灌溉渠道发生明显淤积。

由图 5b) 可知, 方案 2 除占比仅 1.7% 的特粗颗粒沙全部沉积外, 沉沙池的其他颗粒全粒径沉沙效率约为 72.8%, 即引水中的 72.8% 的泥沙淤积在沉沙池里。8 月份引水含沙量 2.62 kg/m³ 最高时, 通过沉沙池后的水体含沙量降低为 0.60 kg/m³。其中, 占总质量 65% 的粗沙含沙量为 0.009 kg/m³, 几乎全部沉积; 而占总质量约 35% 的细沙含沙量为 0.625 kg/m³, 细沙颗粒极小, 不易沉积, 因此也不会在湿地公园和灌溉渠道发生明显淤积, 方案 2 的泥沙沉积率略低于方案 1。

全年泥沙沉积厚度分布见图 6, 引水流场分布见图 7。由图 6a)、7a) 可知, 受平面环流的影响, 方案 1 在沉沙池入口形成一个大的明显环流, 使泥沙沉积靠南岸, 全年最大淤积厚度为 1.25~1.50 m, 极大值点为 1.67 m; 由图 6b)、7b) 可知, 方案 2 在沉沙池入口形成一大一小两个明显环流, 使泥沙沉积中偏南, 且流场受两个环流的压制使泥沙更多淤积在口门处, 全年最大淤积厚度为 1.50~1.75 m, 极大值点为 2.11 m, 方案 2 的泥沙淤积更加集中, 更容易堵塞。

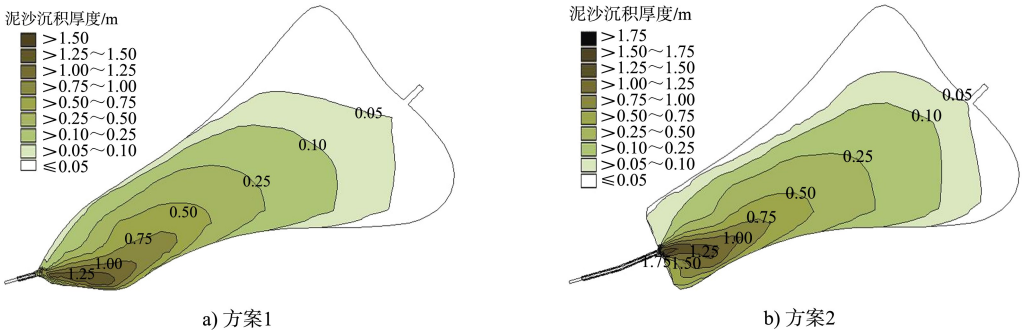


图 6 全年泥沙淤积厚度分布

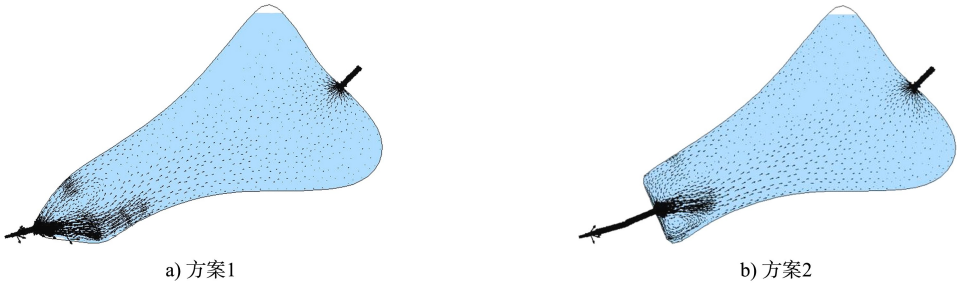


图 7 引水流场分布

8 结 论

- 1) 黄河上游泥沙颗粒较细，在不具备自流排沙条件时，采用条渠沉沙池是可行的。
- 2) 通过模型验证，采用的 MIKE21 泥沙运输模型以及选取的计算参数是合理的。
- 3) 通过沉沙池的沉沙效率、全年淤积厚度及流场分布计算结果可知，泥沙粒径越大沉积越快，主要沉积在距离沉沙池入口 100 m 范围内；细沙的沉积率较小，在沉沙池全程较为均匀，且沉沙率随沿程距离的增加较为明显。
- 4) 两种进口形式的沉沙池方案计算结果表明，沉沙池进口较窄时比方形进口沉积效果好，流场分布较好，口门处不易堵塞。

参考文献：

[1] 中交水运规划设计院有限公司.靖远县靖乐渠环境治理工程设计(一标段)[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2021.

[2] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报 2019[M].北京:中国水利水电出版社,2020.

[3] 祁媛媛.鸭子荡水库泥沙淤积的数值模拟分析及调沙方案研究[D].西安:西安理工大学,2019.

[4] 山西省水利水电勘测设计研究院.水利水电工程沉沙池设计规范:SL/T 269—2019[S].北京:中国水利水电出版社,2019.

[5] 董安健,李现社.水工设计手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2014.

(本文编辑 王璁)

征 订 通 知

2022 年《水运工程》杂志征订工作已经开始，请登录《水运工程》杂志社官方网站 www.sygcc.com.cn 首页下载中心下载“2022 年《水运工程》征订通知单”，有关要求和反馈信息一应俱全。