



某拦河闸坝枢纽鱼道工程水力学特性试验研究

胡东¹, 张震², 王勤振²

(1. 淮安市港航事业发展中心, 江苏 淮安 223001; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 某闸坝枢纽作为天然河道上的永久性水工建筑物, 其修建将对原河道天然水生生态环境连续性产生阻隔, 影响鱼类洄游繁殖。为保障鱼类洄游成效, 需要在枢纽上修建鱼道。针对鱼道设计方案能否满足水力学条件的问题, 进行了不同水位组合条件下鱼道的整体水力特性和鱼道进出口数量与布置的研究。采用比尺为 1:16 的物理模型试验方法, 验证鱼道设计方案的合理性。结果表明, 在推荐的鱼道布置和进口段采取补水措施下, 各项水力指标均能满足规范和设计要求; 当鱼道进口主流流速较小时, 需要采用进口段补水措施满足诱鱼设计要求。

关键词: 结构形式; 水流流态; 水力特性; 模型试验

中图分类号: U612; S956.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0156-07

Hydraulic characteristics test of fishway engineering in river barrage hub

HU Dong¹, ZHANG Zhen², WANG Qinzhen²

(1. Huai'an Port and Shipping Business Development Center, Huai'an 223001, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: As a permanent hydraulic structure on a natural river, the construction of a certain dam hub will create a barrier to the continuity of the natural aquatic ecological environment of the original river, affecting the migration and reproduction of fish. To ensure the effectiveness of fish migration, it is necessary to build fish lanes on the hub. We carry out the study on the overall hydraulic characteristics of the fishway and the number and layout of its inlet and outlet under different water level combinations, in order to determine whether the design scheme of the fishway can meet the hydraulic conditions. We use a physical model test method with a scale of 1:16 to verify the reasonability of the fishway design scheme. The results show that under the recommended layout of the fishway and the implementation of water replenishment measures in the inlet section, all hydraulic indicators can meet the codes and design requirements. When the mainstream flow velocity at the entrance of the fishway is relatively low, it is necessary to adopt inlet section water replenishment measures to meet the requirements of fish-luring design.

Keywords: structural form; flow regime; hydraulic characteristics; model test

为恢复天然河道的通航功能, 通过建设某低坝枢纽对该河段进行渠化。根据鱼类调查结果, 该河段存在溯河生殖洄游的淡水鱼类, 枢纽的建成将阻断鱼类洄游的上溯通道, 对鱼类生存环境产生影响, 种群间遗传交流受阻, 导致遗传多样

性下降, 因此需要在修建永久性拦河闸坝同时建造过鱼设施。由于过鱼设施布置受空间限制, 并要达到预期过鱼效果, 特别是鱼道进出口水流条件要求水力指标较高, 需要通过模型试验加以研究, 验证过鱼设施方案的可行性、有效性。

收稿日期: 2023-09-01

作者简介: 胡东 (1989—), 男, 工程师, 从事内河船闸、港口、航道水运业务的管理与研究。

1 过鱼形式选择

目前过鱼设施较多, 可采用技术实用的方法(技术型过鱼设施)或模仿自然的方法(仿自然型过鱼设施)构造, 主要包括鱼道、仿自然通道、鱼

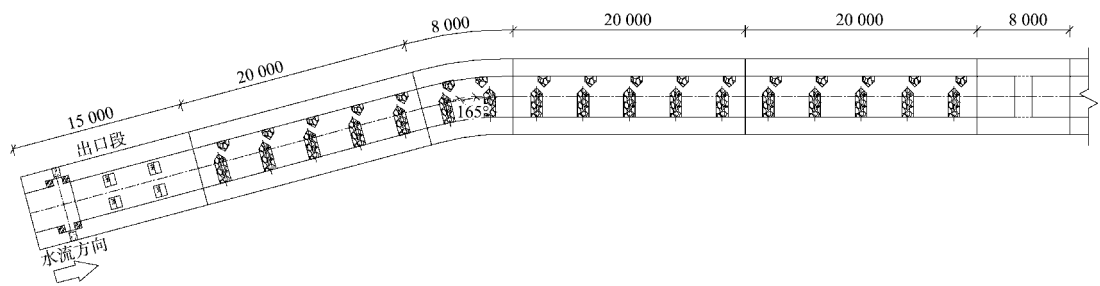
闸、升鱼机、集运鱼系统等, 过鱼措施方式选择需要对枢纽工程区地形条件、工程特性(枢纽布置、坝型、坝高)、水力学条件、鱼类生物学特性等方面进行综合比选。各过鱼设施比选见表 1。

表 1 各种过鱼设施应用范围与效果

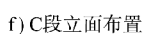
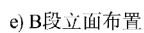
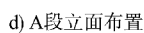
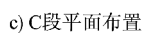
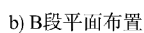
过鱼设施类型	原理	应用范围	特点	效果
仿自然通道	绕过大坝, 模仿自然外观, 呈现自然形式的鱼道	适用于所有具有足够空间的构筑物, 对上游蓄水位变化较大的建筑不适用	优点: 适应生态恢复原则, 鱼类较易适应, 连续过鱼, 易于改造。 缺点: 占地面积较大; 结构不稳定, 须结合技术型鱼道构造	可使所有水生动物种类通过, 为流水性水生生物提供栖息空间
鱼道	内部设有各式隔板、狭槽等, 将水槽分隔成一系列互相沟通的水池, 有时成阶梯式	形式较多, 适用于中、低水头大坝, 或用于大坝改造增设过鱼设施	优点: 消能效果好, 结构稳定、占地小, 连续过鱼。 缺点: 设计难度较大, 不易改造	鱼道形式多样, 狭槽型鱼道可通过较大水流, 便于形成较好的吸引水流, 一般不易堵塞; 水池型鱼道所需流量较低, 容易堵塞
鱼闸	为凹形通道, 上下游两端都可有控闸门的开关或往通道注水形成吸引流	适用于高水头, 或空间以及水流量有限区域。	建造和维修费用高, 适用于大型鱼类	主要适用于游泳能力弱的鱼类, 对中、底层以及小型鱼类不适用
升鱼机	配置有运送水槽和机械装置的升降机, 通过把鱼从下游吊起送到上游, 通过渠道连通上游	适用于高水头, 或空间以及水流量有限的区域。升鱼机通常是上下游落差在 10 m 以上高度的情况下唯一适用的鱼道类型	优点: 需要空间小。 缺点: 对设计和建造要求高, 建造和维修费用高	主要适用于游泳能力弱的鱼类, 对中、底层以及小型鱼类不适用
集运鱼系统	与升鱼机作用原理基本相同, 通过坝下集鱼设施把鱼收集后, 利用陆域运鱼系统将坝下鱼类运至库区放流, 达到坝下、坝上鱼类繁殖交流	适用于高水头, 或空间以及水流量有限区域, 如高坝等	优点: 需要空间小, 设施布置灵活。 缺点: 所需设施要求相对较高, 运行费用高, 受诱鱼效果的制约较大, 特别是诱集底层鱼类较困难	该类型过鱼设施应用范围较广, 针对鱼类生物学特征设计集鱼、运鱼系统, 过鱼效果较好

本工程属于低水头工程, 受滩地征地红线范围影响, 鱼道布设在枢纽左岸上下游斜坡上, 并从左岸连接坝穿过, 因此宜采用鱼道形式。设计过鱼对象主要为青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼等半洄游性鱼类。鱼道进口位于泄水闸尾水下游, 以泄水闸尾水起到诱鱼作用, 出口位于泄水闸上游^[1]。

鱼道池室净宽为 3.5 m, 池室长度为 4 m(垂直隔墙中心之间的距离), 每隔 20 或 15 个池室布置 1 个休息室, 鱼道总长 851.50 m, 底坡为 1/80。鱼道具体布置见图 1、2, 鱼道类型为横隔板竖缝式, 竖缝宽度 0.5 m^[2]。



a) A段平面布置



注：鱼道由 A、B、C 段组成

图1 鱼道总体布置(尺寸: mm; 高程: m)

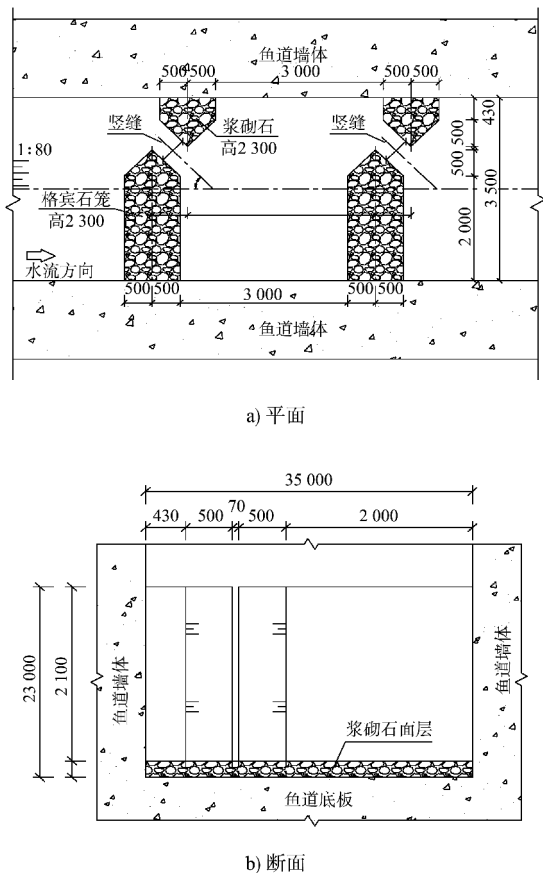


图 2 鱼道局部结构 (单位: mm)

2 鱼道水力特性试验与结果分析

2.1 鱼道水力特性

2.1.1 模型与工况设计

根据调查, 本工程河道记录的 73 种鱼类中,

有草鱼、鳊、鲮、鲢为生殖洄游性鱼类, 其余鱼类均为土著种类, 无长距离洄游习性, 它们属于定居性鱼类, 对生殖环境要求不高。每年的 4—7 月为这些鱼类的主要产卵季, 以产黏性卵和沉性卵为主, 河道是其主要产卵场。产卵活动结束后, 繁殖群体和幼鱼多顺水而下, 在合适的区域进行摄食栖息。

该河段洄游性鱼类喜爱流速在 0.3~0.5 m/s, 感应流速为 0.2 m/s, 极限流速在 1.0 m/s 以上, 本工程鱼道孔口、竖缝设计流速取 0.9~1.2 m/s。

本文依据某枢纽鱼道工程及相应池室结构进行物理模型设计及制作, 如图 3 所示。鱼道整体模型设计为正态模型, 按重力相似准则进行模型设计。综合考虑鱼道结构尺度及模型场地限制, 鱼道整体模型几何比尺确定为 1:16。模型应满足几何相似、水流运动相似和动力相似, 遵循弗劳德相似准则。为保证在模型上能准确复现天然地形, 确保模型制作精度, 鱼道整体模型平面放样采用平面导线控制系统, 平面位置误差控制在±5 mm 以内; 地形制作采用断面法, 断面平均间距 90 cm 左右, 基本上与主河道垂直, 地形高程误差在±0.3 mm 以内。鱼道槽身、隔板采用塑料板制作^[3]。鱼道水力学模型如图 4 所示。

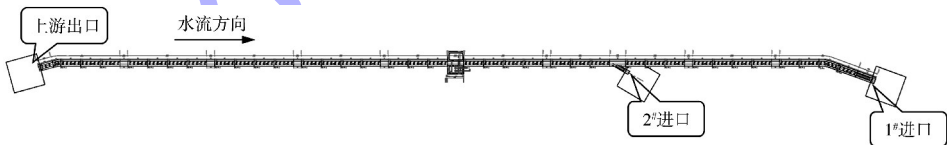


图 3 鱼道整体模型布置

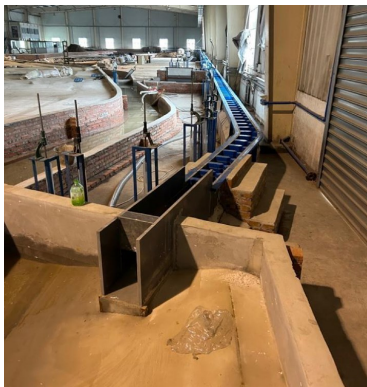


图 4 鱼道整体现场模型

研究鱼道对上下游水位变化的适应性、多进口运行调度方案的合理性及鱼道在不同水位组合条件下沿程水力特性, 结合工程实际运行工况(表 2), 试验选取 9 组水位及进口运行组合方案, 见表 3。其中包括 6 组 1#进口运行工况和 3 组 2#进口运行工况。其中工况 1~3 为上游水位 75.00 m 时不同下游水位变化, 包括最低下游水位、下游常水位及 1#进口运行最高水位; 工况 4 为上游最高水位与下游最低水位(最大水头差), 鱼道进出口水深

接近；工况 6、7 为相同水位下 1[#]、2[#]进口切换调度方案；工况 7~9 为 2[#]进口运行工况。

表 2 鱼道设计运行水位

设计运行水位	最高水位/m	最低水位/m	水位变幅/m
上游	76.00	75.00	1.00
下游	71.82	66.97	4.85

表 3 模型试验工况

工况	上游水位/m	下游水位/m	进口	出口水深/m	进口水深/m
1	75.00	66.97	1 [#]	1.00	2.07
2	75.00	67.97	1 [#]	1.00	3.07
3	75.00	68.65	1 [#]	1.00	3.75
4	76.00	66.97	1 [#]	2.00	2.07
5	76.00	67.97	1 [#]	2.00	3.07
6	76.00	68.65	1 [#]	2.00	3.75
7	76.00	68.65	2 [#]	2.00	1.00
8	76.00	69.32	2 [#]	2.00	1.67
9	76.00	71.82	2 [#]	2.00	4.17

本工程中鱼道下游运行水位变幅较大，设计采取了不同高程的双进口方案以适应水位变化，为方便比较，以下对不同进口运行时的鱼道沿程水面线进行分析。

2.1.2 1[#]进口运行

鱼道 1[#]进口共有 6 种运行工况，各工况下鱼道内沿程水位变化见图 5(图中横轴为当前位置至鱼道上游出口的距离)。通过模型试验结果分析可知，上游水位抬高，水面线沿程变化基本类似，相邻池室间的水位差基本一致；下游水位抬高，水深沿程增大，池室间落差逐渐较小，最下游池室间的平均落差均小于 0.05 m，均满足 SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》^[4]规定。

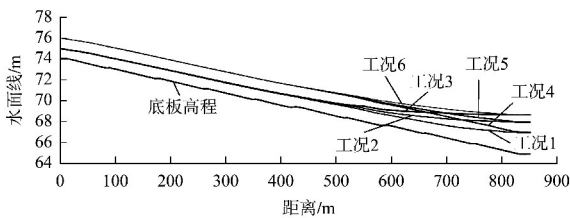


图 5 1[#]进口各工况鱼道内沿程水位

不同水位组合条件下，鱼道沿程水深有所变化，造成相邻池室水位差不同，进而影响鱼道竖缝流速，1[#]进口各工况下鱼道内竖缝流速沿程变化见图 6。通过模型试验结果分析可知，竖缝流速平顺，上游流速在 1.02~1.08 m/s，下游流速在 0.29~0.90 m/s，大于过鱼对象感应流速 0.20 m/s，小于极限流速 1.20 m/s，均满足 SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》规定。

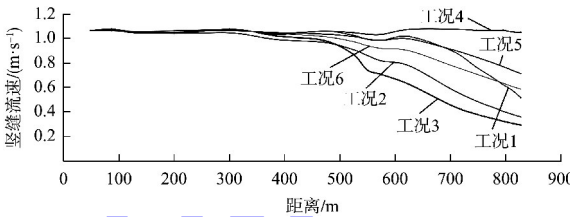


图 6 1[#]进口各工况鱼道内竖缝流速

各工况下鱼道各鱼池内的水流流态基本相同，总体来看，池室中存在着 2 种不同流态，即连通两级竖缝的主流区和形成封闭流线的回流区。如图 7a)所示，在主流两侧各存在一个较为对称的回流区，左侧回流为逆时针方向，右侧回流为顺时针方向。

本鱼道工程共设置了 8 个休息池和 1 个过坝段(观察室)，与典型池室相比，休息池内的水流流态发生了明显改变，各工况下沿程休息池流态基本一致，由于两端隔板的纵向距离较长，水流出上游竖缝后直接顶冲右侧边壁，贴近边壁行进，至休息池末端附近后受下游隔板影响，折向竖缝，见图 7b)；过坝段由于纵向距离更长，主流从竖缝流出后贴右侧边壁至休息池中段逐渐分散均匀，上游段左侧形成较大面积回流区，见图 7c)；2[#]进口上级竖缝处水流经由竖缝流出后同样贴右侧边壁而后转向左侧边壁，由于进口分汊处宽度增大，主流路径较长，见图 7d)。



a) 池室



b) 休息池



c) 过坝段(观察室)通道



d) 2#进口附近休息池

图7 鱼道各部位流态

2.1.3 2#进口运行

鱼道2#进口运行的共有3种运行工况,各工况下鱼道内沿程水位变化见图8(图中横轴为当前位置至鱼道上游出口的距离)。通过模型试验结果分析可知,上游水位抬高,水面线沿程变化基本类似,相邻池室间的水位差基本一致;下游水位抬高,水深沿程增大,池室间落差逐渐较小,最下游池室间的平均落差均小于0.05 m,均满足SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》规定。

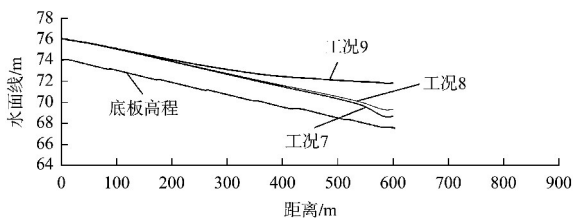


图8 2#进口各工况鱼道内沿程水位

不同水位组合条件下,鱼道沿程水深有所变化,造成相邻池室水位差不同,进而影响鱼道竖缝流速,2#进口各工况下鱼道内竖缝流速沿程变

化见图9。通过模型试验结果分析可知,竖缝流速平顺,除工况7外,上游流速在1.00~1.02 m/s,下游流速在0.49~1.20 m/s,大于过鱼对象感应流速0.2 m/s,小于或等于极限流速1.2 m/s,均满足SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》规定。

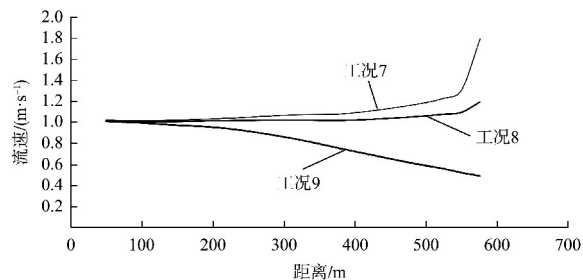


图9 2#进口各工况鱼道内竖缝流速

2#进口运行各工况下的池室及休息池流态与1#进口运行工况基本一致。

2.2 鱼道进出口

2.2.1 鱼道进口

鱼道进口是洄游鱼类进入鱼道的主要门户,是鱼道最重要的组成部分。本工程鱼道进口距离泄水闸较远,主要依靠鱼道自身流量形成诱鱼水流,水流流速不应低于过鱼对象感应流速0.2 m/s。各工况下鱼道进口主流流速见表4。

表4 鱼道进口主流流速

试验工况	上游水位/m	下游水位/m	进口主流流速/(m·s ⁻¹)
1	75.00	66.97	0.07
2	75.00	67.97	0.05
3	75.00	68.65	0.04
4	76.00	66.97	0.15
5	76.00	67.97	0.10
6	76.00	68.65	0.08
7	76.00	68.65	0.29
8	76.00	69.32	0.18
9	76.00	71.82	0.07

通过试验结果分析可知,上游水位相同时进口主流流速随下游水位提高逐渐减小,其中1#进口运行工况下,进口流速均低于过鱼对象的感应流速,不满足设计要求,2#进口运行工况下,仅

工况 7 时进口流速达到 0.29 m/s，其余工况均不满足 SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》要求，应通过补水等措施提高进口流速^[5]。

2.2.2 鱼道出口

本工程中鱼道出口段水流平顺，流速分布均匀，见表 5。各工况下流速均为 0.15 m/s 左右（小于 0.5 m/s），满足 SL 609—2013《水利水电工程鱼道设计导则》要求。

表 5 鱼道进口主流流速

试验工况	上游水位/m	出口主流流速/(m·s ⁻¹)
1~3	75.00	0.15
4~9	76.00	0.15

2.3 进口补水

当鱼道进口流速低于鱼类感应流速，无法满足设计及规范要求，因此本工程中拟对鱼道进口部分采取补水措施，通过在进口段底板设置补水进口，增大进口段流量，提高进口流速^[6]。通过对补水流量进行试算及试验，提出各工况的补水流量建议值，见表 6。其中工况 3 需补水流量最大，为 2.08 m³/s。

对各工况下鱼道进口及附近在开启补水前后的流场分布进行对比，见图 10。可以看到增加补水后，进口流速显著增大，进口附近水流平顺，可以对过鱼对象产生较好的引导效果。

表 6 鱼道补水流量及流速变化

试验工况	上游水位/m	鱼道流量/(m ³ ·s ⁻¹)	补水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	合计流量/(m ³ ·s ⁻¹)	补水前进口主流流速/(m·s ⁻¹)	补水后进口主流流速/(m·s ⁻¹)	增加流速/(m·s ⁻¹)
1	75.00	0.54	0.91	1.45	0.07	0.20	0.13
2	75.00	0.55	1.60	2.15	0.05	0.20	0.15
3	75.00	0.55	2.08	2.63	0.04	0.20	0.16
4	76.00	1.07	0.38	1.45	0.15	0.20	0.05
5	76.00	1.08	1.07	2.15	0.10	0.20	0.10
6	76.00	1.06	1.57	2.63	0.08	0.20	0.12
7	76.00	1.03	—	1.03	0.29	0.29	0.00
8	76.00	1.07	0.10	1.17	0.18	0.20	0.02
9	76.00	1.09	1.83	2.92	0.07	0.20	0.13

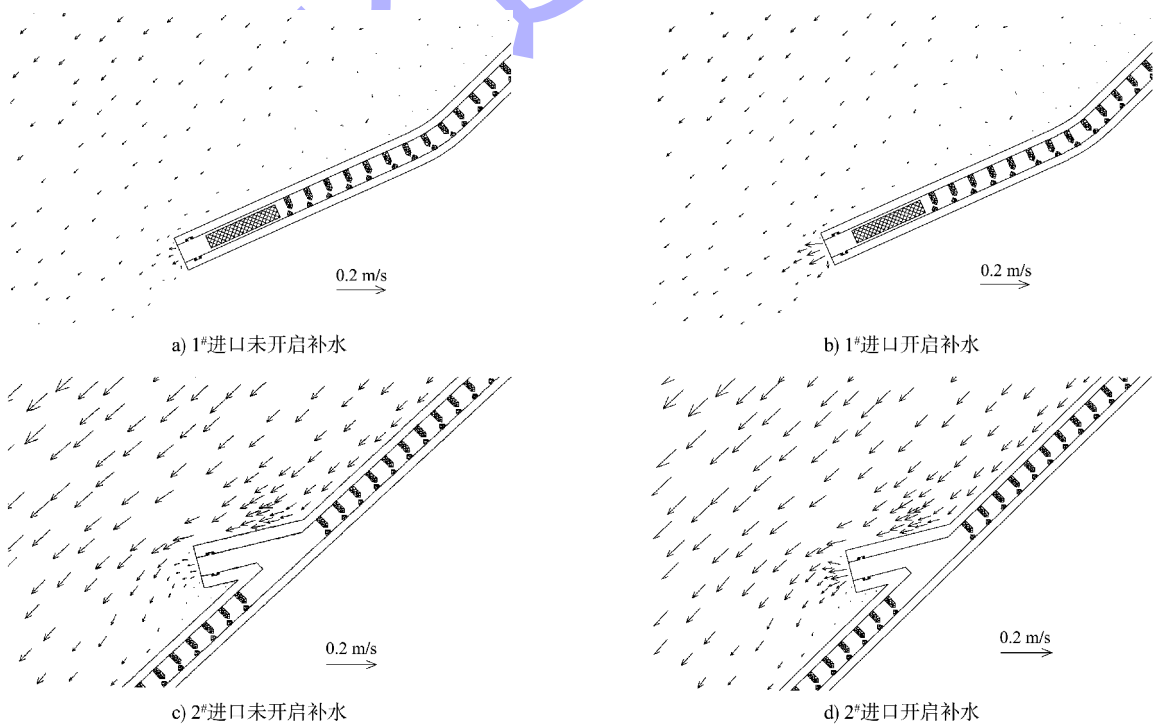


图 10 鱼道进口及附近补水前后流场