

跌扩式消力池临底流速及水流流态分析

张文静¹, 孙玉琦², 张 坤¹

(1. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250000; 2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014)

【摘 要】基于模型试验和数值模拟, 研究了一定水力条件、突扩比分别为 1.0、1.3、1.6 的跌坎消力池内临底流速分布规律及水流流态。结果表明: 突扩使跌坎消力池内各纵断面临底流速分布发生较大变化, 出现流速分层现象。不同突扩比对各纵断面上最大临底流速的影响有所不同, 中线上的临底流速因突扩的存在而降低, 中线两侧的临底流速随突扩比的增大而增大。临边墙处的最大临底流速因突扩的存在而大大降低, 且随突扩比的增大而持续降低, 但降低幅度随突扩比的增大而明显减小。研究成果可为跌扩式消力池设计及运行提供参考。

【关键词】跌扩式消力池; 水流流态; 临底流速; 数值模拟

【中图分类号】TV135.2

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-09-0030-04

Analysis on Near-bottom Flow Velocity and Flow Regime of Drop-Expansion Stilling Basin

ZHANG Wenjing¹, SUN Yuqi², ZHANG Kun¹

(1. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250000, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Based on model tests and numerical simulation, this paper discusses the investigation of the distribution law of near-bottom flow velocity and flow regime in the drop-expansion stilling basin under certain hydraulic conditions with sudden expansion ratios of 1.0, 1.3 and 1.6. The results indicate that sudden expansion greatly changes the distribution of near-bottom flow velocity at each longitudinal section of the drop-expansion stilling basin and causes flow velocity stratification. The influence of different sudden expansion ratios on the maximum near-bottom flow velocity of each longitudinal section varies. The near-bottom flow velocity on the center line decreases due to sudden expansion. The near-bottom flow velocity on both sides of the center line increases with the growth of sudden expansion ratio. The maximum near-bottom flow velocity near the side wall is greatly reduced by sudden expansion and continues to decline with the increase of sudden expansion ratio, whereas the reduction range decreases obviously. The research results can provide a reference for the design and operation of drop-expansion stilling basins.

Key words: Drop-expansion stilling basin; Flow regime; Near-bottom flow velocity; Numerical simulation

高水头、大单宽流量的水利工程大多选用挑流方式进行消能。近年来, 随着人们对生态环境要求的提高, 挑流消能泄洪雾化所带来的环境影响不断引起重视。传统底流消能雾化小, 但用于大型泄水工程中常因临底水力学指标过高而引发破坏。为解决这一难题, 同时发挥其环保优势, 一些专家学者开始探究一种新型的底流消能方式——跌扩式消力池, 即将常规底流消力池底板下移, 同时将两侧边墙外移对称扩宽。目前对跌

扩式消力池临底水力学指标包括临底流速特性有了一定程度的研究^[1-5]。但已有研究中对临底流速的研究大部分仅分析了消力池中线处的临底流速, 而突扩的存在会引起消力池整个底板流速分布的改变, 需进一步对其进行研究。为更好地指导工程实践, 通过水工模型试验和数值模拟, 对消力池底板临底流速特性及消力池内水流流

收稿日期: 2026-04-14

作者简介: 张文静(1991—), 女, 工程师

态进行了研究。

1 试验模型与测点布置

1.1 试验模型及试验方案

试验完成于山东农业大学水利工程实验室。消力池宽度分别设置为 $B=0.5\text{ m}$ 、 0.65 m 、 0.8 m (即突扩比分别为 1.0、1.3、1.6), 消力池长度 $L=1.2\text{ m}$, 尾坎高度 $d=0.16\text{ m}$, 水工模型尺寸设置如图 1 所示。每种模型选择 3 种试验流量 ($Q=0.022\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.033\text{ m}^3/\text{s}$)。在模型试验的基础上,通过 Flow3D 软件建立数值模拟模型进行模拟计算,模拟边界条件采用流量 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时的实测边界数据。

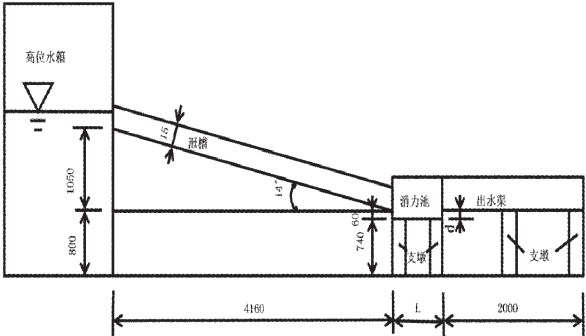


图 1 水工模型设计图 mm

1.2 测点布置

采用毕托管来测量流速,顺水流方向选取 5 个对称纵断面进行测量。突扩比为 1.0 时,测量断面为 A、B、B'、C、C';突扩比为 1.3 时,测量断面为 A、C、C'、D、D';突扩比为 1.6,测量断面为 A、C、C'E、E'。断面布置如图 2 所示。

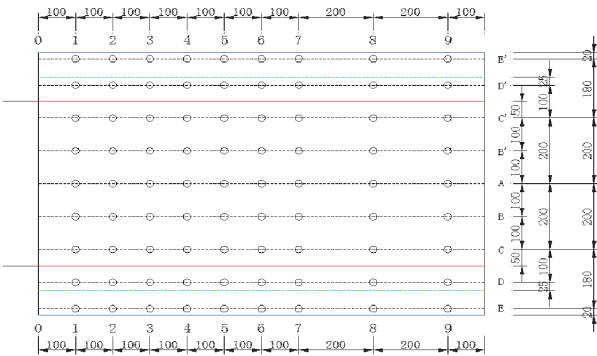


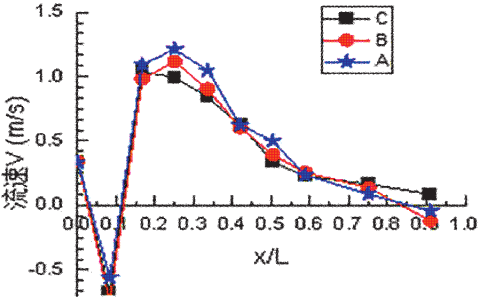
图 2 测点断面布置图 mm

2 结果分析

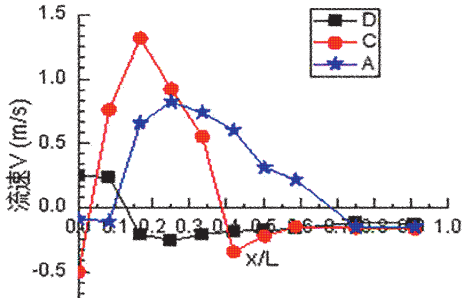
2.1 临底流速分布

根据消力池内水力特性指标的对称性,为提

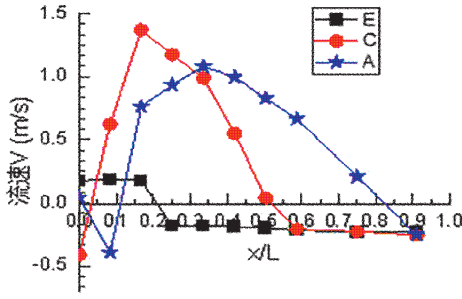
高数据准确性,临底流速采用对称断面测量流速的平均值。当消力池突扩比 $\beta=1.0$ 、1.3、1.6,入池流量 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时,消力池各测量断面的临底流速分布情况如图 3 所示,其中 X 轴表示测点到消力池入口跌坎的距离(x)与消力池池长(L)的比,Y 轴表示测点流速(V)。



(a) $\beta=1.0$



(b) $\beta=1.3$



(c) $\beta=1.6$

图 3 临底流速分布图

由图 3(a)可得:突扩比 $\beta=1.0$ (无突扩)时,各纵断面临底流速分布基本一致,在消力池前端有回流现象,而后出现急速升高再下降的谷峰型流速,且随入池流量的增加,临底流速上升越迅速下降越缓慢。冲击区($V>V_{\text{max}}/2$)出现在 $(1/6\sim 5/12)L$ 之间。

由图 3(b)可得:突扩比 $\beta=1.3$ 时,消力池内临底流速分布与突扩比 $\beta=1.0$ (无突扩)时相比发生明显变化,各纵断面临底流速相差较大,中线(断面 A)仍为先有回流而后上升再下降的谷峰

型流速,但上升及下降速度较突扩比 $\beta=1.0$ 时变缓,冲击区($V>V_{\max}/2$)出现在 $(1/6\sim5/12)L$ 之间;中线两侧(断面 C)临底流速变为急速升高再急速下降的尖峰型流速,与中线相比流速峰值升高,冲击区提前,冲击范围减小,冲击区($V>V_{\max}/2$)出现在 $(1/12\sim1/4)L$ 之间。临边墙(断面 D)临底流速与中线及中线两侧相比大大降低,主要以回流为主,各测点流速绝对值相差不大,流速在 $-0.25\sim0.25$ m/s 之间。

由图 3(c)可得:突扩比 $\beta=1.6$ 时,消力池内临底流速分布规律与突扩比 $\beta=1.3$ 时相同,各纵断面临底流速相差较大,中线(断面 A)仍为谷峰型流速,但冲击区范围与突扩比 $\beta=1.3$ 时相比呈变大趋势,冲击区($V>V_{\max}/2$)出现在测点 $(1/6\sim7/12)L$ 之间。中线两侧(断面 C)临底流速为仍尖峰行流速,与中线相比流速峰值升高,冲击区提前,冲击范围减小,但冲击区比突扩比 $\beta=1.3$ 时相对延后,冲击区($V>V_{\max}/2$)出现在测点 $(1/6\sim1/3)L$ 之间。临边墙(断面 E)仍主要以回流为主,临底流速值比突扩比 $\beta=1.3$ 时更低,流速在 $-0.23\sim0.19$ m/s 之间。

2.2 最大临底流速分析

最大临底流速是消力池内临底水力特性指标中的主要控制指标,因跌扩式消力池内部分区域有回流现象,因此在分析各测量断面最大临底流速时采用流速的绝对值进行分析,即不考虑水流方向只考虑流速大小。当入池流量分别为 $0.022\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.033\text{ m}^3/\text{s}$ 时,中线(断面 A)、中线两侧(断面 C)、临边墙上最大临底流速与突扩比之间的关系如图 4 所示。

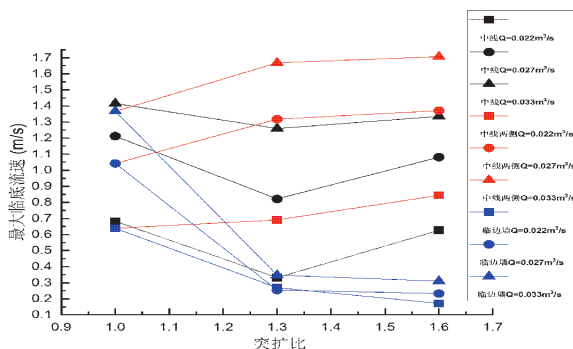


图 4 最大临底流速与突扩比关系图

由图 4 可得:1)三种入池流量下,突扩的存在均可以有效降低中线(断面 A)上的最大临底流速,但最大临底流速并非随突扩比的增大而减

小。当 $Q=0.022\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别降低了 51.5%、8.3%;当 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别降低了 32.2%、10.7%;当 $Q=0.033\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别降低了 35.9%、5.7%,突扩比越大,其降低程度越小。2)中线两侧(断面 C)上的最大临底流速因突扩的存在均呈增大趋势,且随突扩比的增大而增大。当 $Q=0.022\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别增加了 8.2%、32.1%;当 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别增加了 26.4%、31.6%;当 $Q=0.033\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别增加了 22.0%、24.8%。3)三种入池流量下,突扩的存在均可以大大降低临边墙的最大临底流速,且随突扩比的增大而持续降低,但降低幅度明显减小。当 $Q=0.022\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别降低了 57.8%、73.2%;当 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时分别降低了 75.5%、77.6%;当 $Q=0.033\text{ m}^3/\text{s}$ 时,突扩比从 1.0(无突扩)分别变为 1.3、1.6 时,最大临底流速较无突扩时降低了 74.5%、77.3%。

2.3 数值模拟消力池水流流态分析

为弥补试验测量的局限性,更加直观、清晰地看出消力池底板水流流态及临底流速分布情况,通过数值模拟得到 $Q=0.027\text{ m}^3/\text{s}$ 时,3 种模型下消力池底板及中线纵平面上的流速矢量图如图 5、图 6 所示,图中流速的方向和大小由箭头的方向和大小来表示。

由图 5 可得:突扩的存在使入射主流在进入消力池后失去两侧边墙的约束,致使消力池内临底流速分布较无突扩时发生明显变化,形成横向分层。两侧主流流速方向发生改变,由正向转变为斜向,导致水流提前潜底,回流区变短,由于提前潜底使两侧主流减少了与消力池内水体的掺和与摩擦,致使中线两侧临底流速相对增大。中部水流受两侧水流的约束,流速方向虽仍为正

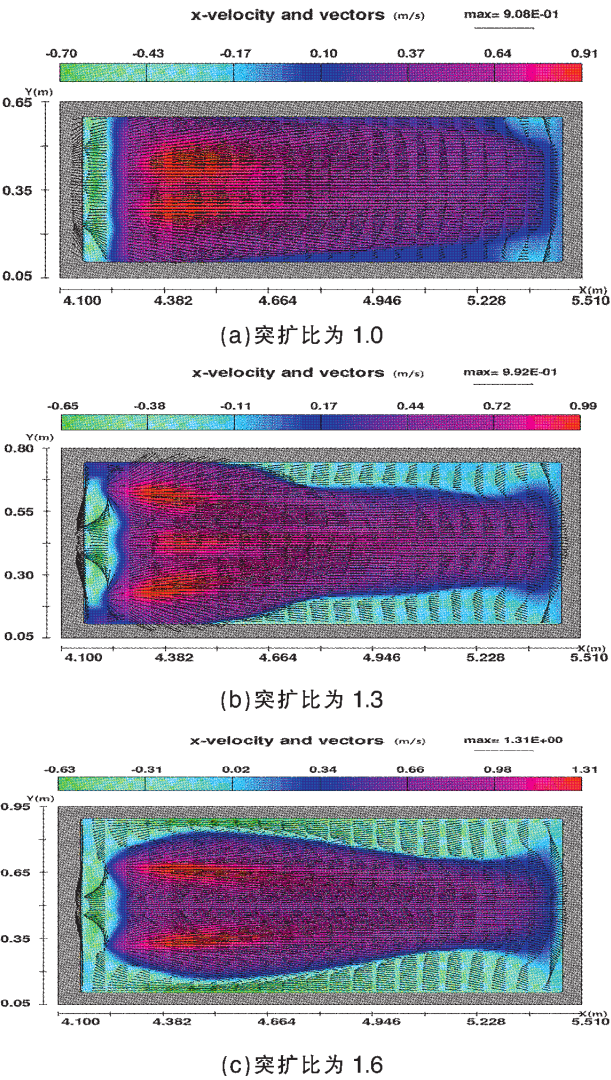


图5 消力池底流速矢量图

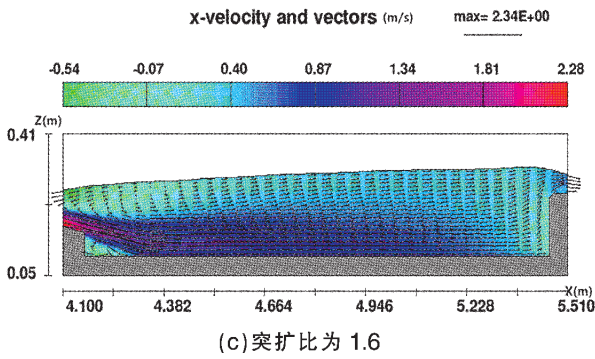
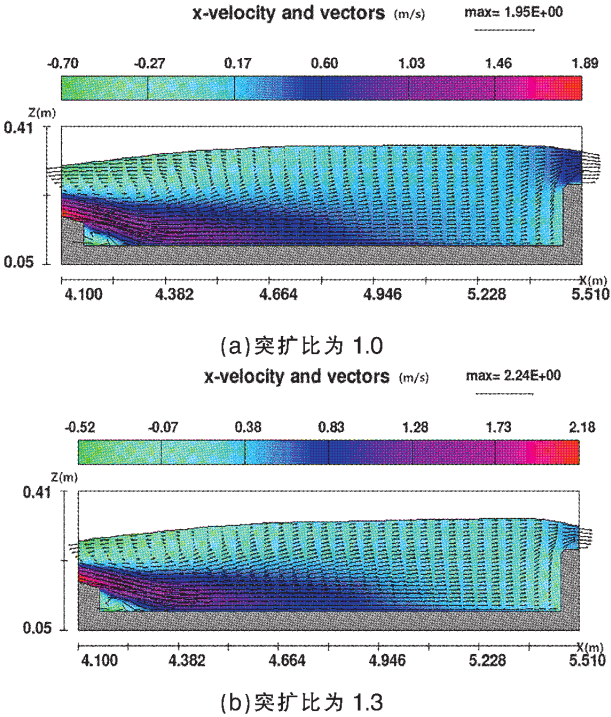


图6 消力池中线纵断面流速矢量图

向,但因为池宽变宽,单宽流量相对减小,携带能量减小临底时流速相对减小。射向边墙水流经过与突扩处的水垫进行掺和摩擦后,流速得到降低,部分区域出现回流现象,致使边墙处临底流速得到有效降低。

由6图可得:3种突扩比下,消力池内的水流均有明显的流速分层现象。随突扩比的增大,消力池内水深降低,上部旋涡区随之减小,使得主流淹没程度减小,同时,由于上部旋涡区及入池主流淹没程度减小,使得消力池入池主流流速增大,突扩比为1.0时,最大入池流速为1.89 m/s、突扩比为1.3时,最大入池流速增大至2.18 m/s、突扩比为1.6时,最大入池流速增大至2.28 m/s。入池主流流速的增大,致使入池主流潜底后出现最大临底流速随之增大的现象。

3 结 论

1)无突扩时,跌坎消力池内各纵断面临底流速分布基本一致,在消力池前端有回流现象,而后出现急速升高再下降的谷峰型流速,且随入池流量的增加谷峰越大,临底流速上升越迅速下降越缓慢。突扩后消力池内临底流速分布与无突扩时相比发生明显变化,各纵断面临底流速相差较大,中线仍为先有回流而后上升再下降的谷峰型流速;中线两侧临底流速变为急速升高再急速下降的尖峰型流速,与中线相比流速峰值升高,冲击区提前,冲击范围减小;临边墙处临底流速与中线和中线两侧相比大大降低,以回流为主,各测点流速绝对值相差不大。

2)突扩可以有效降低中线上的最大临底流速,但突扩比越大较无突扩时降低程度越小,即随突扩比的增大中线上最大临底流速先减小后增大。突扩使中线两侧上的最大(下转第37页)