

进出水口双向流动结构流速分布与脉动规律研究

高学平¹, 朱洪涛¹, 刘殷竹¹, 孙博闻¹, 陈 昊²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300022)

摘要:抽水蓄能电站水道系统侧式进出水口因内部分流隔墩等导致流动复杂, 其内部双向流动规律尚不清晰。本文以某实际工程进出水口为基础建立典型进出水口试验装置, 利用先进的流速量测仪器进行试验研究。基于粒子图像测速技术(PIV)量测结果, 揭示了侧式进出水口内部双向流动规律, 出流工况, 中孔扩散段内形成明显的主流且位于孔口中上部, 扩散段及调整段顶部形成低流速区, 边孔扩散段内主流不明显; 进流工况, 中孔及边孔调整段顶部存在低流速区, 水流汇入扩散段后流速分布趋于均匀。基于声学多普勒测速技术(ADV)量测结果, 揭示了拦污栅断面脉动流速规律, 出流工况, 其脉动流速很大, 流速脉动值可达到时均值的1.8倍, 有别于脉动值较小的一般规律; 进流工况, 其脉动流速较小, 符合脉动值绕时均值上下波动的一般规律。研究成果将为优化进出水口体型参数和分析引起拦污栅振动破坏提供理论依据。

关键词:进出水口; PIV; ADV; 流速场; 脉动流速

中图分类号: TV732.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20210971

1 研究背景

进出水口是抽水蓄能电站水道系统的重要组成部分, 主要分为侧式进出水口与井式进出水口^[1]。侧式进出水口因内部分流隔墩等导致流动复杂, 其内部水流双向流动规律尚不清晰。为探明侧式进出水口内部双向流动规律, 提高抽水蓄能电站的运行效率, 本文以侧式进出水口为对象展开试验研究。

目前对于侧式进出水口的研究成果大多围绕具体的实际工程展开, 重点集中于水力特性优化^[2-4]、库区流态优化^[5-6]、进出水口体型优化算法^[7-8]等方面。蔡付林等^[2]研究了扩散段内7种分流墩布置方式对进出水口水力特性的影响程度, 指出三隔墩四孔进出水口的中间分流墩宜短于两侧分流墩; 任晓倩等^[3]对进出水口扩散段导流墩的位置及中、边孔的扩散角进行了优化调整, 解决的流量分配不均的问题; 徐准等^[4]系统分析了扩散段内隔墩位置的改变对进出水口水力特性的影响; 高学平等^[5]研究了进出水口明渠两侧地形不对称时明渠及进出水口的水流流态, 并提出了相应的优化方法; 高学平等^[6]以潍坊抽水蓄能电站下水库侧式进出水口为例, 探寻改善进出水口及围堰附近水流流态的有效措施; 高学平等^[7-8]结合多岛遗传算法、响应面法等遗传算法建立优化体型参数与水力指标的函数关系, 提高了传统体型优化方法的效率。上述成果均围绕具体工程进出水口水力学问题展开, 缺少对进出水口内部双向流动规律全面详细的研究。

物理模型试验是研究侧式进出水口水力特性的主要手段, 一般针对某个实际工程进出水口进行试验, 采用旋浆流速仪、电磁流速仪或ADV流速仪等量测典型断面的流速分布, 以时均值描述流动规律, 根据试验结果优化进出水口体型。姜成海等^[9]对仙居抽水蓄能电站进行了水工模型试验, 量

收稿日期: 2021-10-30; 网络首发时间: 2022-03-10

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20220309.1334.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179077)

作者简介: 高学平(1962-), 博士, 教授, 主要从事工程水力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

通讯作者: 刘殷竹(1992-), 博士, 助理研究员, 主要从事水力学研究。E-mail: yz_liu@tju.edu.cn

测了拦污栅断面的时均流速值, 试验结果表明该断面的平均流速满足过栅流速的要求; 孙双科等^[10]对张河湾抽水蓄能电站上水库进出水口进行试验, 研究了侧式进出水口拦污栅断面时均流速分布规律, 分析了扩散段隔墩布置型式与过渡段体型对拦污栅断面时均流速分布的影响, 并提出消除拦污栅断面负流速的工程措施。章军军等^[11]结合大树子抽水蓄能水电站下库进出水口试验, 优化了侧式短进出水口在出流时流速分布不均匀与水头损失系数较大的问题。上述研究均以时均值描述流动规律, 缺少对典型断面脉动流速的量测和分析。

粒子图像测速技术(PIV)能对内部流速场进行量测, 具有非接触、高精度、区域测量等优势。其基本工作原理, 是通过在流体中投入一定浓度的示踪粒子, 用激光照亮测量区域, 同时用CCD相机进行拍摄, 最后对图像进行处理分析。例如, Song等^[12]和Gao等^[13]利用PIV研究了在非线性温度分层型水库中的浮式取水口附近流场, 从流速场角度对下泄水温形成机理进行分析; 杨帆等^[14]利用PIV研究了轴流泵内部水流流场; 陈凯霖等^[15-16]利用PIV研究了明渠水流交汇区流场及污染物浓度分布规律; 柳梦阳等^[17]基于粒子图像测速技术研究淹没植被斑的时均尾流结构。因此PIV技术可实现侧式进出水口内部流速场的量测。

目前对进出水口水力特性的研究均以流速时均值描述其流动规律, 认为脉动流速较小, 符合脉动值绕时均值上下波动的一般规律, 缺少对典型断面脉动流速的深入研究, 同时也缺少对进出水口内部流动的试验研究。本文以典型侧式进出水口为对象进行试验研究, 利用粒子图像测速技术(PIV)和声学多普勒测速技术(ADV), 获得进出水口内部流速场、沿程断面流速和拦污栅断面流速分布, 全面揭示进出水口内部双向流动规律。

2 研究对象

图1为某工程的典型侧式进出水口体型图。沿进流方向, 侧式进出水口由防涡梁段、调整段、扩散段、渐变段等组成, 其前接明渠段与库区相连, 其后接输水隧洞与输水系统相连。在双向水流条件下, 侧式进出水口各组成段起到不同的作用。防涡梁段是防止进流工况进出水口前形成旋涡; 扩散段和调整段是调整出流工况隧洞来流, 使隧洞来流到达拦污栅断面时流速分布趋于均匀。该典型进出水口采用3隔墩4孔口布置(图1), 孔口高度8.7 m, 宽度6.3 m, 防涡梁段长10.5 m, 调整段长14.5 m, 扩散段长度36 m, 水平扩散角 34.3° , 垂向扩散角 2.35° , 输水隧洞直径7.2 m。出流工况(从进出水口流出进入水库), 流量 $158.0\text{ m}^3/\text{s}$, 输水隧洞平均流速 3.88 m/s ; 进流工况(从水库流入进出水口), 流量 $114\text{ m}^3/\text{s}$, 输水隧洞平均流速 2.80 m/s , 死水位条件下孔口中心的淹没深度 13.15 m , 正

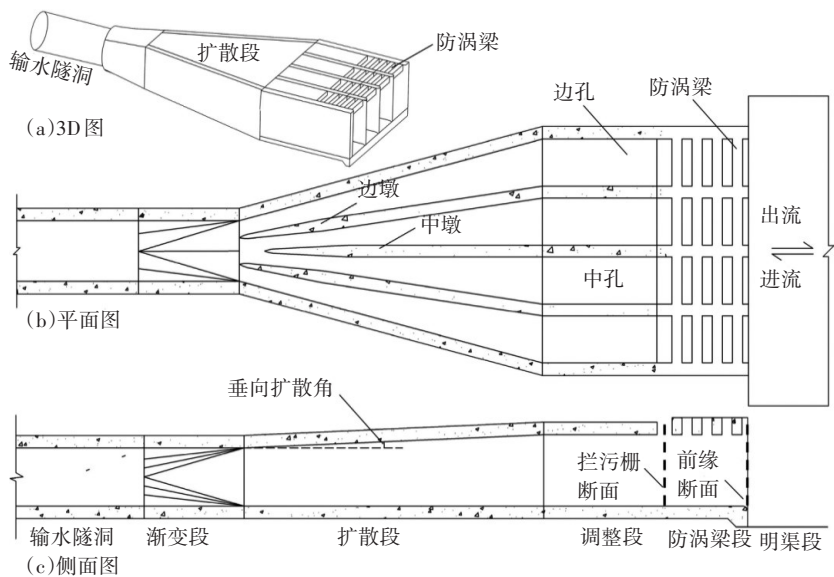


图1 典型侧式进出水口体型

常蓄水位条件下孔口中心淹没深度 30.15 m。

3 试验方法

3.1 试验装置 以上述实际工程进出水口为基础，按几何缩尺 60 建立了典型进出水口试验装置，如图 2 所示。该试验装置在天津大学水力学实验室内，总长约 12 m，由供水管路系统、侧式进出水口模型、流量控制系统等组成。供水管路系统包括高平水塔、集水箱、管路、稳流装置；流量控制系统包括电磁流量计和阀门等。出流工况，水流自高平水塔沿出流管经过阀门、流量计、隧洞流入进出水口，再向明渠段及库区内扩散，经过稳水装置后汇入集水箱；进流工况，水流自高平水塔沿进流管经过稳水装置稳流后，进入库区、明渠段，流入进出水口及隧洞。

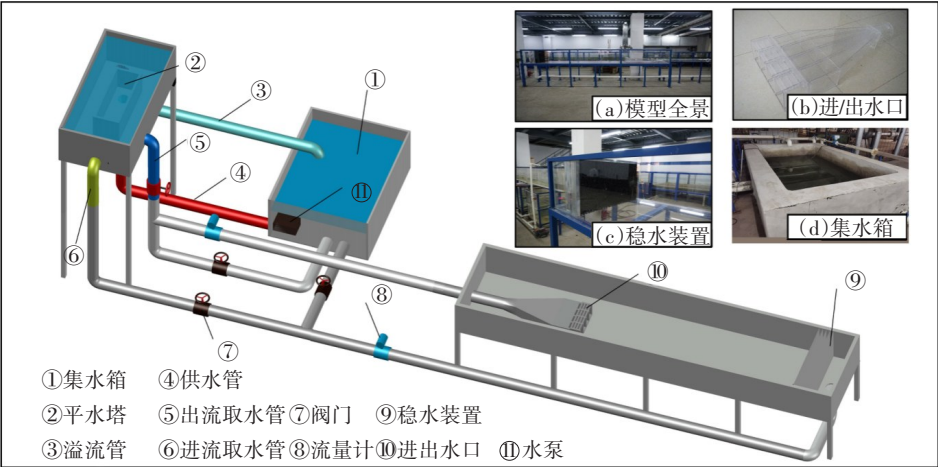


图2 试验装置

3.2 量测系统及试验方法 量测系统如图 3 所示，包括粒子图像测速仪(PIV)、声学多普勒流速仪(ADV)、水位测针。PIV 主要由 Nano TRL 425-10 双脉冲激光器(激光波长为 532 nm)、Imager SX 4M CCD 相机、导光臂等组成。

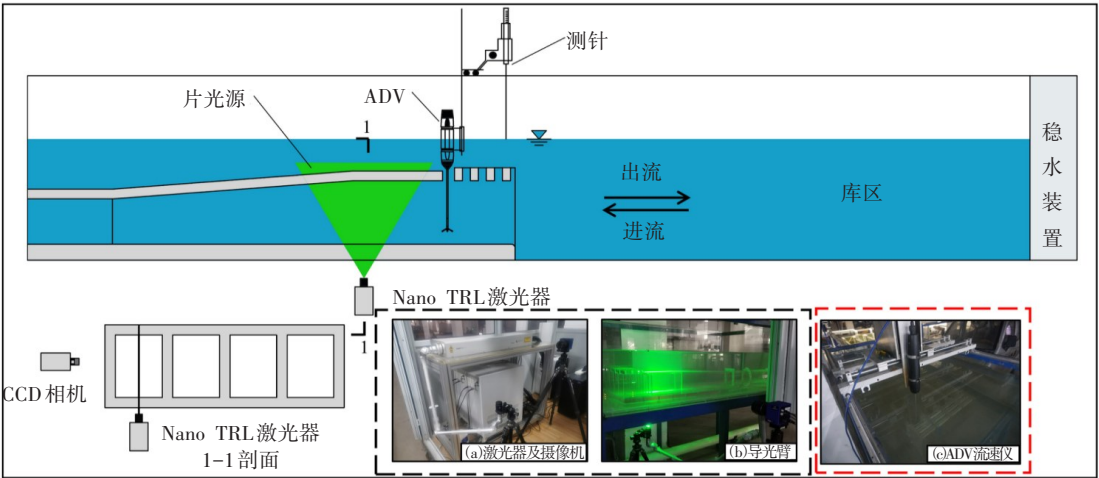


图3 量测系统布置

试验利用 PIV 量测进出水口内部纵剖面流场，采用分区域拍照的方法，单次测量的覆盖范围为 40 cm×30 cm(横向×垂向)，PIV 的激光源布置于进出水口下方，激光经过透镜转换成约 1 mm 的片光

源,从底部照亮测量部位,CCD相机垂直于片光源布置;试验时采用跟随性较好的空心玻璃珠作为示踪粒子,其直径 $11\text{ }\mu\text{m}$ 、密度 $1.02\times 10^3\text{ kg/m}^3$;采用双帧双曝光模式,曝光时间间隔为 $1000\text{ }\mu\text{s}$,相机采样频率为 10 Hz ,图像后处理采用DAVIS8.0软件,图像处理采用互相关算法,查询区域为 32×32 像素。利用ADV量测孔口拦污栅断面流速分布,沿水深方向共均匀布置了15个测点,采样频率 100 Hz 。考虑到流道狭窄,探头相对较大,接触式测量点流速可能影响精度,分析如下,由于ADV的测点位于探头正下方约 5 cm 处,因此在测量该断面靠近上部的7个测点时,ADV探头无需进入通道内,其结果无影响;对于下部8个测点,ADV探头需进入到流道,本文流道宽度 105 mm 、高度 145 mm ,而ADV仪器测量杆直径为 6.5 mm 、测量爪直径约 2.5 mm ,而且测点在探头下方 5 cm 处不与探头接触,因此其对测量结果的影响可以忽略。

4 试验结果

下面按出流工况和进流工况,给出死水位条件下进出水口内部和拦污栅断面流速的量测结果,给出不同淹没度下拦污栅断面的流速分布及紊动强度。流速按无量纲量给出,即流速值 u 与孔口平均流速 v_{out} (出流工况)或 v_{in} (进流工况)的比值;距底板距离按无量纲给出,即距底板距离 y 与孔口高度 H 的比值。

4.1 出流工况 出流工况,水流自隧洞段流入进出水口,经过扩散段分流后从进出水口的4个孔口流出,水流流动沿程呈现出扩散态,流速沿程降低。

4.1.1 进出水口内部流动规律

(1)进出水口内部流速场。图4为由PIV量测的进出水口中、边孔内部中心剖面流速云图。出流工况,中孔扩散段内主流明显且位于孔口中部,水流沿程逐渐扩散,流速逐渐减小,部分扩散段顶部及调整段顶部存在小范围低流速区(图5);边孔内主流不明显,顶板沿程不存在低流速区。从进出水口内部流速变化过程来看,中孔受逆压力梯度变化影响更明显,存在明显的流动分离再附着现象,但水流经过调整段整流后,流速分布趋于均匀。

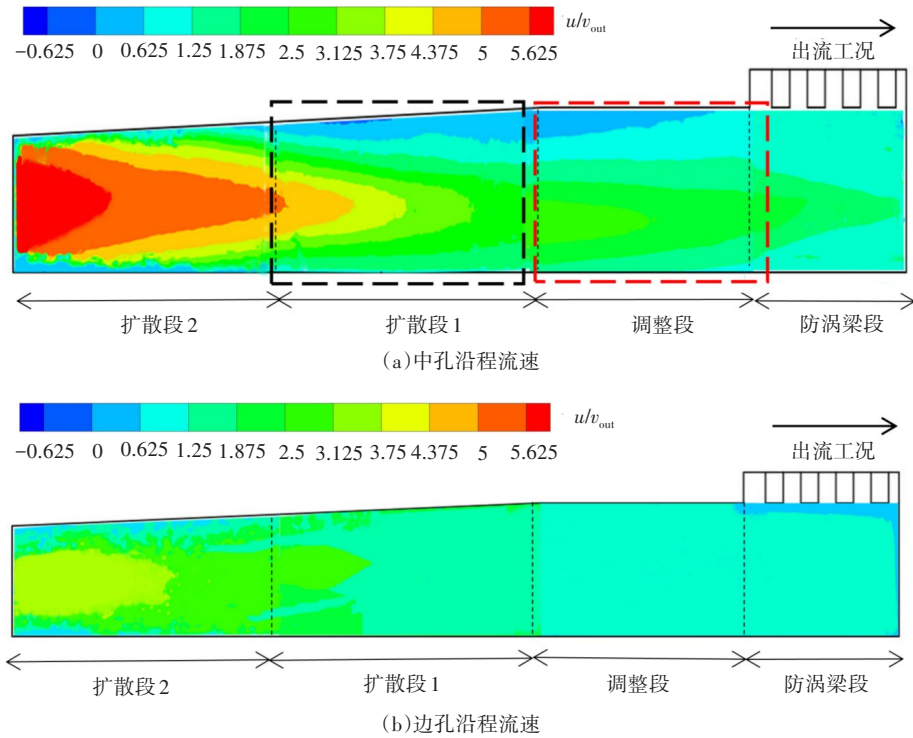


图4 PIV量测的进出水口内部中心剖面流速云图

(2)进出水口内部沿程断面流速分布。为分析进出水口内部沿程断面流速变化,选取中孔和边孔各8条测线进行分析。图6为进出水口内部沿程断面流速分布。对于中孔,水流进入扩散段后主流位

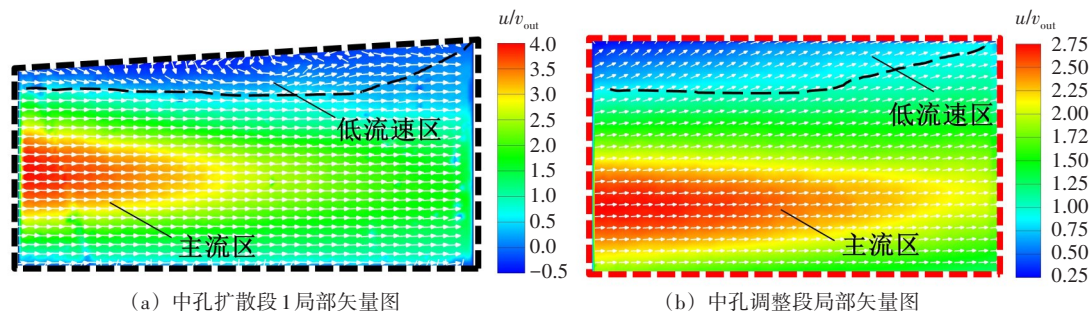


图5 进出水口中孔局部矢量图

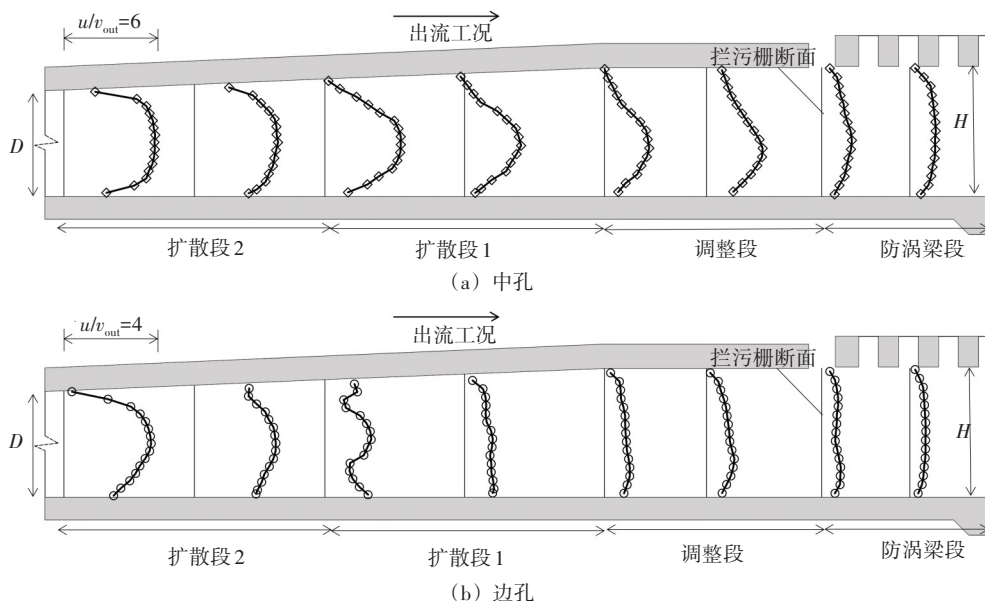


图6 进出水口沿程断面流速分布

于中部,随着水流逐渐扩散,扩散段1中间测线靠近顶板处出现反向流速,水流进入调整段时顶板处流速较低,水流经调整段调整后,逆压梯度影响逐渐减弱,水流到达拦污栅断面时,测线流速分布趋于对称;对于边孔,水流进入扩散段后各测线均未出现反向流速,至调整段断面时流速分布已趋于对称。因此,调整段对中孔而言其调整作用更为明显。

4.1.2 拦污栅断面流速 为保证拦污栅安全,特别关注进出水口拦污栅断面流速分布。以往研究,均是以前时均流速来分析拦污栅断面流速,一般要求过栅平均流速不宜大于1 m/s,断面流速不均匀系数(最大流速/平均流速)宜小于1.5,避免出现反向流速,其目的是减少拦污栅振动破坏的几率,保证拦污栅的安全^[18]。为此,试验利用声学多普勒测速技术(ADV)专门量测了拦污栅断面的流速分布,记录了各测点的流速历时。

(1)时均流速分析。图7为出流工况不同淹没度下拦污栅断面时均流速分布,其中纵坐标为距底板距离 y 与孔口高度 H 的比值,横坐标为流速值与孔口平均流速比值。从图中可以看出,淹没度的变化对时均流速分布基本无影响;中孔流速分布主流靠近孔口中部,无反向流速,边孔流速分布较中孔均匀。死水位条件下中孔流速不均匀系数1.31(最大流速/平均流速);边孔流速不均匀系数1.10。

图8同时对比了死水位工况下PIV与ADV的实测结果,中孔及边孔PIV与ADV的量测结果基本相同。

(2)脉动流速分析。利用ADV专门记录了断面各测点流速历时,并进行了统计分析。选取拦污栅断面8个典型测点,其中测点1—4位于中孔拦污栅断面,测点5—8位于边孔拦污栅断面。图9为死水位条件下典型测点的流速历时过程。可以看出中孔、边孔流速脉动值均很大,脉动流速值接近时均值,甚至大于时均值,有别于脉动值较小且沿时均值上下波动的一般规律。例如,中孔测点3,最大

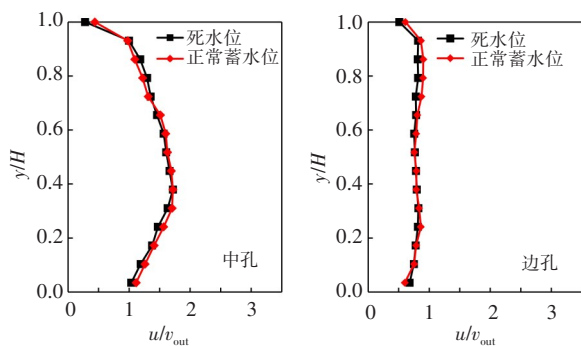


图7 不同淹没度下拦污栅断面时均流速分布

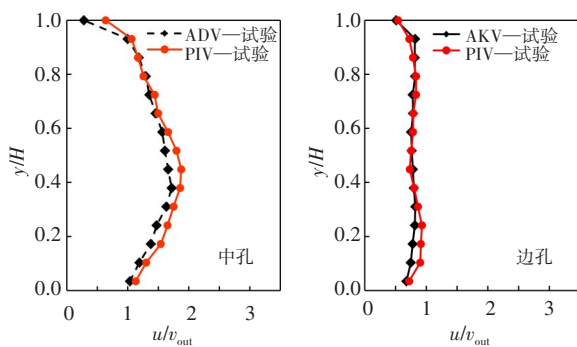


图8 拦污栅断面时均流速分布

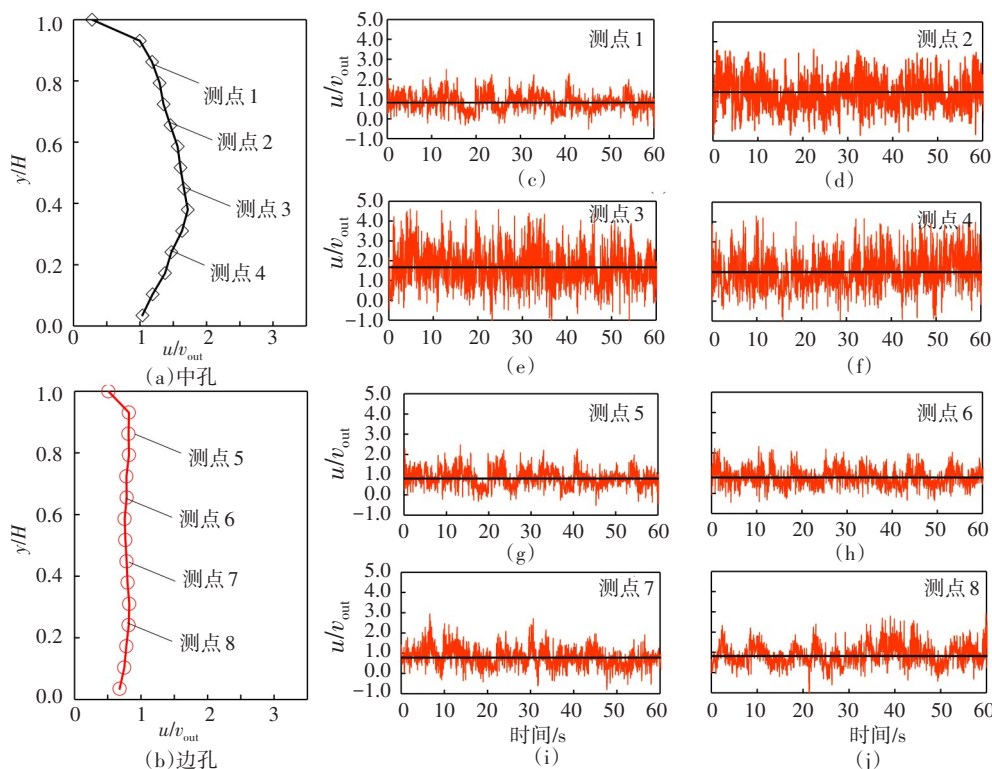


图9 拦污栅断面测点流速历时过程图

脉动流速为 $2.94 v_{out}$ ，时均流速为 $1.66 v_{out}$ ，最大脉动流速与时均流速的比值为 1.8 ($2.94 v_{out}/1.66 v_{out}$)，即最大脉动流速是时均流速的 1.8 倍，这里 v_{out} 为孔口平均流速。

流速脉动幅度大小可用脉动流速 u 的均方根 σ 表示， $\sigma = \sqrt{u^2}$ ，其值直观反映流速脉动幅度的大小。脉动流速均方根与平均流速的比值称为紊动强度 T_u 是无量纲表述流速脉动幅度的参数， $T_u = \frac{\sigma}{v}$ 。图 10 对比了不同淹没度下拦污栅断面各测点紊动强度的变化。从图中可看出，淹没度的变化对紊动强度基本无影响；沿水深方向各测点紊动强度基本相同；中孔的紊动强度明显大于边孔。其中死水位条件下，中孔测点平均紊动强度为 0.70，边孔测点的平均紊动强度为 0.40。而对于一般明渠水流，其 0.5 倍水深位置的紊动强度为 0.06~0.08^[19]。相比一般明渠水流，中孔测点的紊动强度是一般明渠水流 0.5 倍水深位置紊动强度的 10 倍。

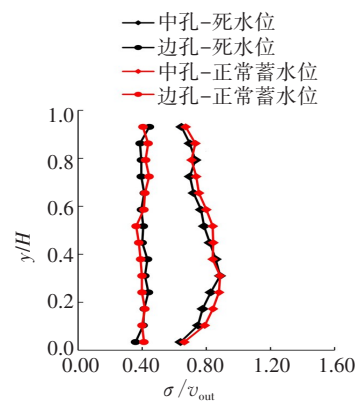


图10 拦污栅断面测点紊动强度

对于拦污栅断面，以往主要研究该断面的时均流速分布，关心时均流速的大小和是否有反向流速，没有关注脉动流速，认为脉动流速值较小且不会对拦污栅安全构成威胁。上述研究结果表明，出流工况，拦污栅断面各点脉动流速大，紊动强度大，将对拦污栅安全构成威胁，必须引起高度重视。

4.2 进流工况 进流工况，水流通过进出水口汇入到隧洞段，水流流动沿程呈现出收缩态，流速沿程增加。

4.2.1 进出水口内部流动规律

(1)进出水口内部流速场。图 11 为由 PIV 量测的进出水口中、边孔内部中心剖面流速云图。进流工况，水流从孔口前缘及防涡梁间隙流入进出水口，在中孔及边孔部分调整段顶部形成了一定范围低流速区(图 12)；水流汇入流道后流速增大、流速分布逐渐增大并趋于均匀。从水流汇入进出水口的过程来看，来流方向存在前方来流及防涡间隙来流，从防涡梁间隙处进入进出水口的水流需经过 90°转折，故易在调整段顶板处形成低流速区。

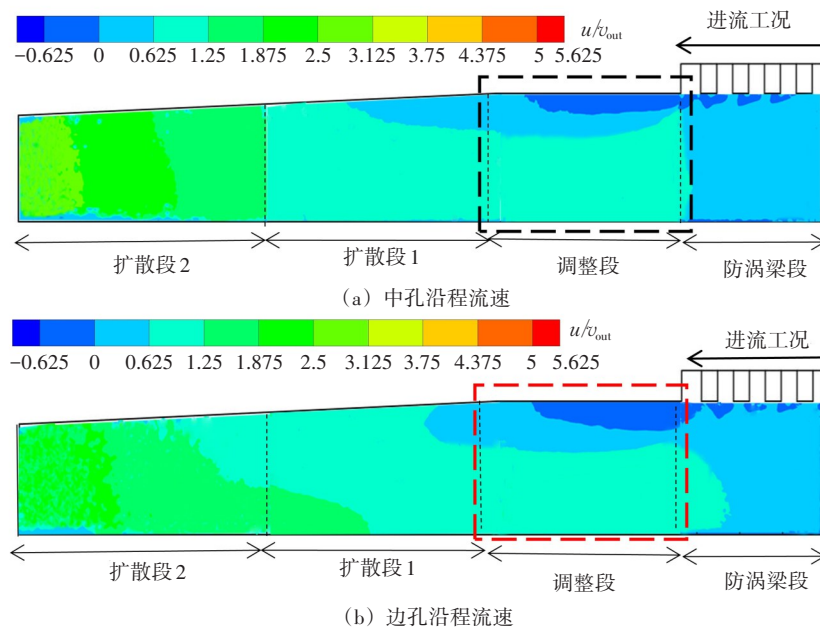


图 11 PIV 量测的进出水口内部中心剖面流速云图

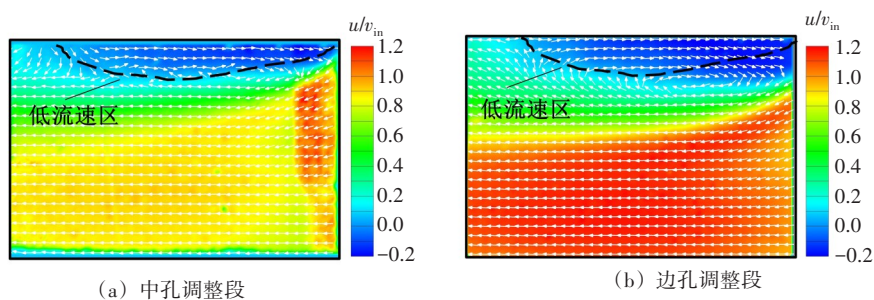


图 12 进出水口中、边孔调整段局部矢量图

(2)进出水口内部沿程断面流速分布。为分析进出水口内部沿程断面流速变化，选取中孔和边孔各 7 条测线进行分析。图 13 为进出水口内部沿程断面流速分布。从图中可以看出，进流工况，中孔及边孔流速分布规律基本相同，边孔流速略大于中孔流速，水流自防涡梁段流进调整段时，中、边孔测线顶部流速较低，底部流速较大。随着水流在扩散段内不断收缩，中、边孔的流速分布逐渐趋于均匀。

4.2.2 拦污栅断面流速

(1)时均流速分析。图 14 为进流工况不同淹没度下拦污栅断面时均流速分布，其中纵坐标为距底

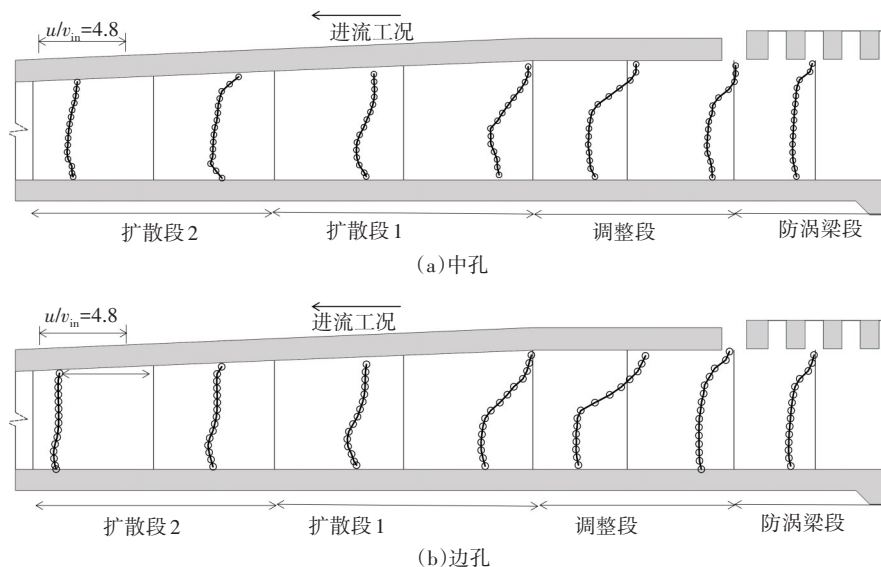


图13 典型断面时均流速分布

板距离 y 与孔口高度 H 的比值，横坐标为流速值与孔口平均流速比值。从图中可以看出，淹没度的变化对时均流速分布基本无影响；中、边孔流速分布规律基本相同，边孔流速略大于中孔流速。

图15同时对比了死水位工况下PIV与ADV的实测结果，中孔及边孔PIV与ADV的量测结果基本相同。

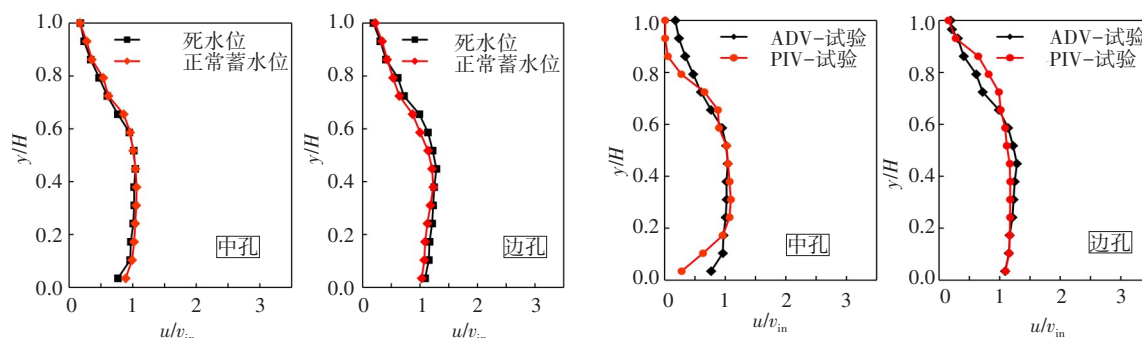


图14 不同淹没度下拦污栅断面时均流速分布

图15 拦污栅断面时均流速分布

(2)脉动流速分析。利用ADV专门记录了断面各测点流速历时，并进行了统计分析。选取拦污栅断面8个典型测点，其中测点1—4位于中孔拦污栅断面，测点5—8位于边孔拦污栅断面。图16为死水位条件下，典型测点的流速历时过程。可以看出中孔、边孔流速脉动值较小，与脉动值较小且围绕时均值上下波动的基本规律相符。例如，中孔测点3，最大脉动流速为 $0.48 v_{in}$ ，时均流速为 $1.04 v_{in}$ ，最大脉动流速与时均流速的比值为 $0.46 (0.48 v_{in}/1.04 v_{in})$ ，即最大脉动流速是时均流速的0.46倍，这里 v_{in} 为孔口平均流速。

图17对比了不同淹没度下拦污栅断面各测点紊动强度的变化。从图中可看出，淹没度的变化对紊动强度基本无影响；中孔、边孔脉动幅度均较小，边孔紊动强度略大于中孔，中孔、边孔各测点脉动流速值均小于时均值。其中死水位条件下，中孔测点平均紊动强度0.10，边孔测点平均紊动强度为0.11。因此，中、边孔测点紊动强度略高于一般明渠水流0.5倍水深位置处的紊动强度。

4.3 讨论 试验结果表明，出流工况水流条件较进流工况更为复杂。进流工况，水流呈现收缩态，水流流速逐渐增大，拦污栅断面水流紊动强度较小，符合脉动值较小且绕时均值上下波动的一般规律。出流工况，水流呈现扩散态，水流流速逐渐减小，拦污栅断面水流紊动强度高，脉动流速很大，有别于对脉动流速的一般认知规律。对于出流工况，即水流自输水隧洞进入进出水口，依次经过扩散段、调整段、防涡梁段，进出水口体型在平面和竖向上均有扩散，属三维扩散结构。水流沿程逐

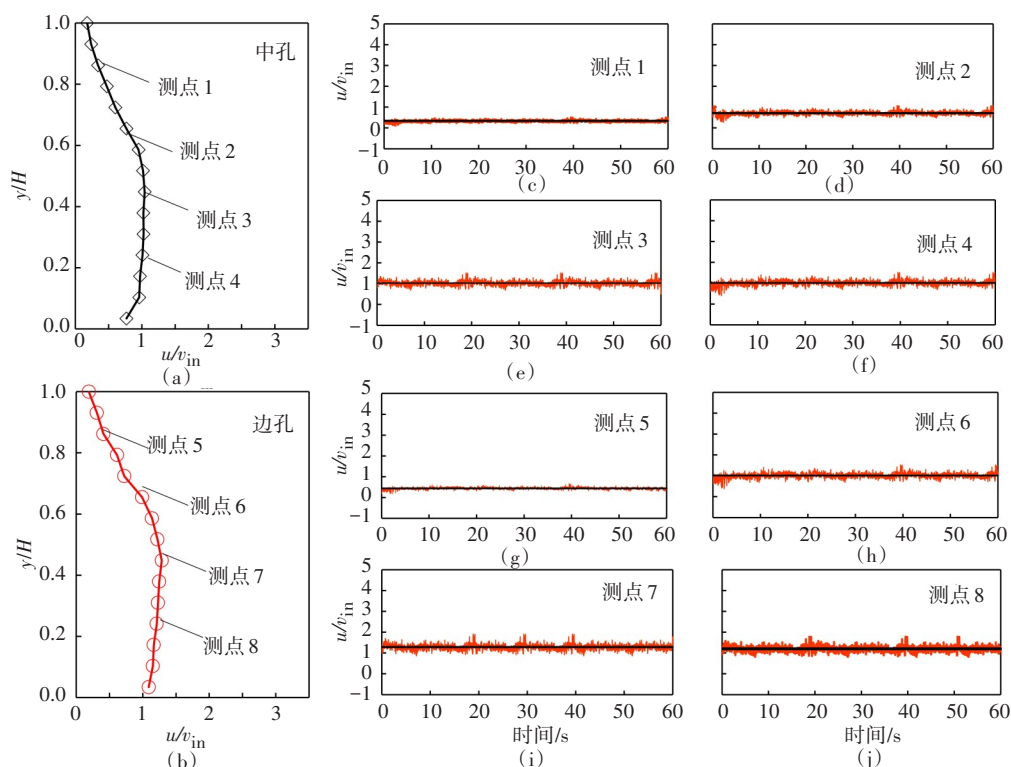


图 16 拦污栅断面测点流速历时过程

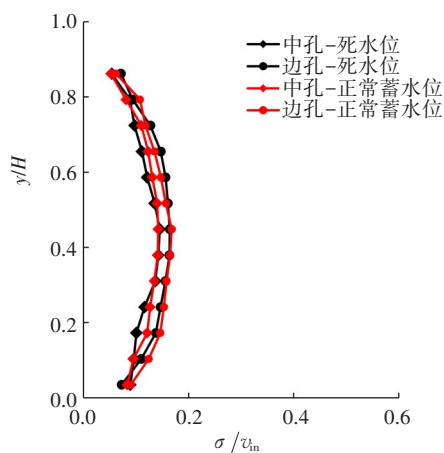


图 17 拦污栅断面测点紊动强度

渐扩散，同时水平扩散和垂向扩散，具有明显的三维流动特征。水流沿程扩散的同时脉动流速增大，进出水口拦污栅断面属扩散水流的末端，其断面的脉动流速仍然很大。以上只是定性的分析，应进一步专门分析拦污栅断面脉动流速大的原因。

5 结论

本文建立了典型侧式进出水口试验装置，利用粒子图像测速技术(PIV)和声学多普勒测速技术(ADV)，对侧式进出水口内部双向流动进行了试验研究，得到以下结论：

(1)利用PIV技术量测了进出水口内部流速场揭示了进出水口内部流动规律。出流工况，中孔扩散段内主流明显且位于孔口中部，扩散段及调整段顶部存在低流速区，边孔扩散段内主流不明显；进流工况，中孔及边孔调整段顶部存在低流速区，水流汇入扩散段后流速分布趋于均匀。

(2)利用 ADV 流速仪量测了拦污栅断面流速历时过程,揭示了该断面流速脉动规律。出流工况,其脉动流速很大,有别于对脉动流速的一般认知规律;进流工况,脉动流速较小,符合脉动值围绕时均值上下波动的一般规律。

(3)对于出流工况,拦污栅断面各点流速脉动值较大,流速脉动值可达时均值的 1.8 倍,紊动强度大,脉动值较大且频繁变化,将对拦污栅的安全构成威胁,必须引起高度重视。

参 考 文 献:

- [1] 邱彬如,刘连希.抽水能电站工程技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [2] 蔡付林,胡明,张志明.双向水流侧式进出水口分流墩研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000(2): 72-77.
- [3] 任晓倩,梅家鹏,陈柏全,等.抽水蓄能电站侧式进出水口体型优化的数值模拟[J].水电能源科学,2014,32(7): 156-159.
- [4] 徐准,吴时强.抽水蓄能电站侧式进出水口隔墩布置对水力特性的影响[J].水利水电科技进展,2020,40(3): 21-27.
- [5] 高学平,朱洪涛,孙博闻,等.不对称地形下进出水口明渠段环流特性研究[J].水力发电学报,2019,38(8): 48-60.
- [6] 高学平,徐天浩,朱洪涛,等.侧式进出水口及邻近围堰环流消除优化研究[J].水力发电学报,2021,40(8): 23-33.
- [7] 高学平,李建国,孙博闻,等.利用多岛遗传算法的侧式进出水口体型优化研究[J].水利学报,2018,49(2): 186-194.
- [8] 高学平,秦孜学,朱洪涛,等.基于响应面模型侧式进出水口体型多目标优化[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(11): 127-132.
- [9] 姜成海,曹玺,何少云.抽水蓄能电站下库进出水口水力特性[J].水利水运工程学报,2013(3): 52-59.
- [10] 孙双科,柳海涛,李振中,等.抽水蓄能电站侧式进出水口拦污栅断面的流速分布研究[J].水利学报,2007,38(11): 1329-1335.
- [11] 章军军,毛根海,程伟平,等.抽水蓄能电站侧式短进出水口水力优化研究[J].浙江大学学报(工学版),2008(1): 188-192.
- [12] SONG Q L, SUN B W, GAO X P. PIV experimental investigation of the outflow temperature from nonlinearly stratified reservoir regulated by floating intake[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 109: 1-13.
- [13] GAO X P, SONG Q L, SUN B W, et al. PIV experimental study on the flow characteristics upstream of a floating intake in nonlinear stratified ambient conditions [J]. Environmental Fluid Mechanics , 2019 , 19 (4) : 1005-1024 .
- [14] 杨帆,胡文竹,刘超,等.轴流泵直管式出水通道内流场数值模拟及 PIV 测试[J].水动力学研究与进展(A 辑),2019,34(6): 795-802.
- [15] 陈凯霖,冯民权,张涛.基于 PIV 技术的明槽交汇区流场试验研究[J].水力发电学报,2018,37(11): 43-55.
- [16] 陈凯霖,冯民权,张涛,等.明槽交汇区污染物浓度场分布规律研究[J].水力发电学报,2019(10): 86-100.
- [17] 柳梦阳,槐文信.基于粒子图像测速技术的淹没植被时均尾流结构研究[J].水利学报,2021,52(11): 1324-1331.
- [18] 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司.抽水蓄能电站设计规范: NB/T10072—2018[S].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [19] IPPEN A T, RAICHLIN F. Turbulence in civil engineering: measurements in free surface streams[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(5): 1-27.

Research on velocity distribution and fluctuation law of bidirectional flow structure of inlet/outlet

GAO Xueping¹, ZHU Hongtao¹, LIU Yinzhu¹, SUN Bowen¹, CHEN Hao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research, Tianjin 300022, China)

Abstract: The side inlet/outlet of pumped storage power station channel system has complicated flow due to internal partial flow barriers, etc., and its internal two-way flow law is not clear. In this paper, a typical inlet/outlet test device is established on the basis of an actual engineering inlet/outlet, and the advanced velocity measuring instrument is used for fine test research. Based on the measurement results of the Particle image velocimetry technology (PIV), it reveals the two-way flow rules. Under outflow conditions, the main flow is formed in the diffusion section of the middle hole and is located in the middle of the orifice, a low-velocity area is formed at the top of the diffusion section and the adjustment section, and the main flow in the side hole is not obvious. Under the inflow condition, there is a low-velocity area at the top of the middle hole and the side hole adjustment section, and the velocity distribution tends to be uniform after the water flows into the diffusion section. Based on the measurement results of Acoustic Doppler Velocimetry (ADV), it reveals the law of fluctuating velocity on the section of the trash rack. The fluctuating velocity of outflow conditions is very large, and can reach 1.8 times of the time-averaged value, which is different from the general rule of smaller pulsations. Under the inflow condition, the fluctuating velocity is very small, which conforms to the general law that the fluctuating velocity fluctuates around the time-averaged value. The research results will provide a theoretical basis for optimizing the parameters of the inlet/outlet shape and analyzing the vibration damage of the trash rack.

Keywords: inlet/outlet; PIV; ADV; velocity field; fluctuating velocity

(责任编辑: 李福田)

(上接第 721 页)

Meso-scale simulation of resistivity of ERCC for RCC overwintering layer in alpine-cold region

LI Mingchao¹, DENG Genhua¹, YU Lixin², ZHANG Mengxi¹, ZHANG Juntao², JIA Chao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co.Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The insulation of over-winter layer is one of the key points for the temperature control of RCC dams in alpine region. Compared with traditional external insulation measures, electrically conductive roller-compacted concrete (ERCC) is a novel functional material, which can solve problems of large temperature difference between inside and outside RCC through heating. The electro-thermal property of ERCC is the main characteristic that distinguishes it from conventional concrete, with electrical resistivity being the key parameter. Firstly, ERCC with different volume fraction of coarse aggregate (VFCA) were designed to measure the electrical resistivity (ER) at different ages, and effect of VFCA on ER was obtained. Then, ERCC-2D mesoscopic model was established to analyze the impact of Interfacial Transition Zone (ITZ) on ER of ERCC. Finally, ERCC-3D meso-numerical models with different VFCA were created by coupling the calculation method of continuous medium and discontinuous medium, which has been proved by experiment. The result shows that VFCA significantly increase the ER of ERCC during the period of 28 d, and the ER of ITZ is quantified, which is 1.5 times of mortar. In order to determine the relationship between ERCC resistivity and aggregate content, a mathematical model of ERCC resistivity is proposed, combining experiment and mesoscopic simulation. The change of specimen size and gradation of aggregates has no effect on the resistivity of ERCC when the VFCA remains constant.

Keywords: RCC dam; ERCC; aggregate volume fraction; electrical resistivity; meso-scope simulation

(责任编辑: 韩 昆)