

文章编号: 1672-3031(2017)02-0101-06

弯道流水域热浮力排放扩散器参数优化物理模型试验研究

陈小莉, 康占山, 赵懿璐, 纪平

(中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100038)

摘要: 弯道流水域排放口布置常选择在弯道凹岸侧, 以充分利用弯道环流加快稀释, 然而弯道环流条件下排放口近区稀释特性与均匀流条件下存在较大差异, 相关研究较少。本文在大比例尺物理模型试验中模拟复杂地形和弯道流动条件下扩散器热浮力排放近区稀释规律, 采用平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术进行断面浓度测量, 分析了弯道环流对近区浮射流稀释扩散的影响, 对扩散器出流仰角、出流水平方位角和离岸距离等进行了优化, 在此基础上提出了适用于弯道水域地形条件热浮力排放的近水平非等高多喷口离岸向排放型式。研究结果对于类似弯道水域热浮力排放扩散器优化研究具有参考意义。

关键词: PLIF; 液态流出物; 弯道流; 浮力射流; 模型试验; 扩散器

中图分类号: TV131

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.02.004

1 概述

初始稀释是污水排放设计中重点关注的问题。扩散器是增大初始稀释度、满足规范要求的有效措施^[1], 在排海和排江工程中应用广泛, 国内关于排海工程的模型试验研究较多^[2-4], 河流水域的扩散器应用研究则相对少。陈祖军等^[5]对长江排污工程进行了研究, 提出了针对等密度排放的多喷口交错出流扩散器型式, 槐文信等^[6]研究了矩形水槽同流向热浮力排放扩散器近区稀释特征与流速比、相对水深、出流仰角等的相关关系, 这些研究一般将环境水域假定为矩形河道均匀流。天然河道排放时弯道流情况是较普遍的, 其流动特性与顺直河道存在较大差异。弯道水域排放口一般选择布置在凹岸深水侧, 弯道螺旋流能加快横向掺混, 陈丽萍等^[7]对弯道内危化品泄漏进行了数值模拟研究, 结果表明在排放口下游同样距离处, 顺直水槽相比弯道水槽的污染物浓度高1倍。对于存在温差浮力效应的电厂温排水, 浮力还会和弯道环流产生相互作用, 倪浩清等^[8]对弯道内浮力湍流进行了数值模拟研究, 结果表明弯道内的热输移扩散与顺直河道差异较大, 存在浮力-离心力-各向异性雷诺应力三者间相互作用。华祖林等^[9]通过试验研究了强弯条件下温差分层流, 结果表明弯道分层流横断面存在多个环流, 比无分层弯道流更为复杂。目前对于天然弯道流条件下的热浮力排放近区稀释研究还很少。本研究针对某内陆核电厂冷却塔弃热水与液态流出物混合排放开展河道物理模型试验, 采用便携式可移动平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术进行浓度测量, 研究弯道环境流条件下的热浮力排放稀释规律以及适宜的扩散器排放型式。

2 模型设计及测量方案

2.1 模型设计 研究针对某内陆核电厂规划的排水河段, 其河宽在300~500 m之间, 排水口位于一个弯道顶冲点附近, 如图1所示。模型按照满足弗劳德数(Fr)和密度弗劳德数(F_D)相似设计, 即:

$$(Fr)_r = V_r / \sqrt{g_r L_r} = 1 \quad (1)$$

收稿日期: 2016-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209228)

作者简介: 陈小莉(1980-), 女, 湖北天门人, 博士, 高级工程师, 主要从事电厂环境水力学研究。

E-mail: chenxl_iwhr@126.com

$$(F_D)_r = V_r / \sqrt{g_r L_r (\Delta\rho/\rho)_r} = 1 \quad (2)$$

式中：下标 r 表示原体与模型比值， Fr 为弗劳德数， V_r 为流速比尺， g_r 为重力加速度比尺， L_r 为长度比尺； F_D 为密度弗劳德数 $(\Delta\rho/\rho)_r$ 为相对密度比尺。当 $(\Delta\rho/\rho)_r = 1$ 时，可以同时满足重力和浮力相似。为了保证流态相似，要求模型雷诺数大于临界雷诺数。试验采用几何比尺 $L_r = 50$ 的正态模型，对应的流速比尺 $V_r = L_r^{1/2} = 7.07$ ，流量比尺 $Q_r = V_r \times L_r^2 = 17677.7$ 。

模型布置在大型环境试验厅内，根据试验弯道水流模拟要求及场地条件，选择排放口上下游河道长度约 2.7 km 范围为模拟区域，布置如图 1 所示，模型河道内壁采用水泥浆抹光以满足糙率相似要求。模型采用两套供水系统，一套为环境流供水系统，模拟环境流动；一套为污水排放供水系统，模拟热浮力排放。扩散器排放环境来流量采用 97% 设计年最小流量 $131 \text{ m}^3/\text{s}$ ，水深约 10 m。电厂排放流量 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，排放水温高于环境水温 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

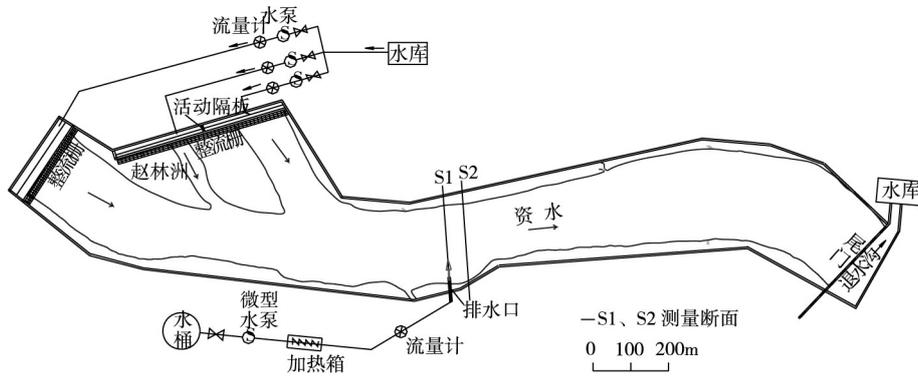


图 1 排放口附近河道地形示意

环境流速测量采用 ADV 流速仪。浓度采集采用了一种便携式 PLIF 荧光浓度测量系统，其优点是设备可灵活移动，便于在大模型上获得清晰的大范围浓度场分布，克服接触式测量过于零散且干扰流场的缺点。该系统使用的激光波长为 450 nm ，测量区域光斑直径为 $2 \sim 3 \text{ mm}$ ，激光器输出功率 3 W ，控制方式为 5 V TTL 高频控制信号。通过模拟信号控制振镜高频扫描，一束激光在短时间内在水体中扫描出一个平面生成片光，这样比通过展光片生成的片光具有更好的均匀度。示踪剂采用荧光素钠，其具有易溶于水、毒性低，对温度不敏感的特点，较适用于温差流动下的浓度测量^[10]，测量采用激光和图像采集设备同时架设在水面上的方案(图 2)。

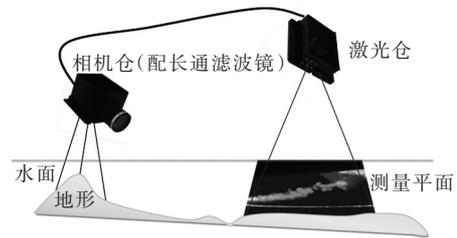


图 2 PLIF 测量布置方案

浓度测量断面选取两个断面 S1 和 S2，距离排放口下游分别为 0 m 及 50 m 断面。

3 测量结果分析

3.1 排水区域流场 对环境流量 $Q = 119 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的流速进行了模拟分析。图 3 所示为排水口断面(S1 断面)流速剖面，可以看出断面流速分布不均匀，流速较大区域集中在偏右岸侧，模型流速剖面与实测水文数据基本吻合。图 4 为排水水域表、底平面流速分布，排水口位于凹岸侧深槽区，其下游岸线开始往河道中心折转束窄，水流绕过下游的凸出码头时流速加大，表、底层流速方向相差较大，底层流速向对岸偏转较显著，这与单一均匀流存在较大差异，污染物在不同水深层的初始稀释受环境流影响会有不同。

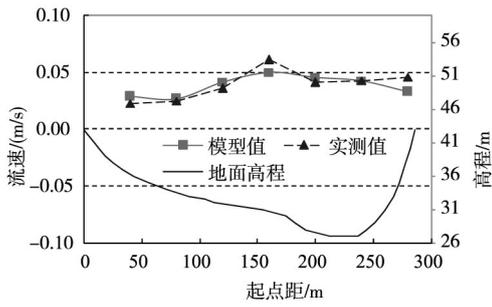


图3 S1断面垂向平均流速分布

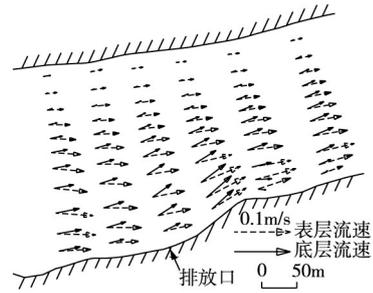


图4 排放水域局部流速场

3.2 不同出流仰角排放结果比较 为了增加稀释掺混宽度，扩散器主管沿河道横断面布置。首先针对2种与环境流方向垂直的初始出流型式进行试验，2种方案支管出流方向均在主管轴线的垂面即出流中轴面，方案1采用等高度垂直向上出流方式，方案2采用不同高度水平朝对岸出流方式。荧光测量平面为出流中轴面，接收相机位于排放口上游。试验得到的浓度分布如图5和图6所示。图5中，方案1垂直向上的射流很快上升至水体表面，环境水体中下层未能有效参与稀释，上升至表层的污染团在浮力作用下会向四周扩散开，相对浓度为0.2的等值线范围向近岸扩展范围较大，且形成回流，这种情况易造成热团在岸边累积。图6中，方案2喷口水平向对岸出流，各喷口射流在不同水深处与环境水体掺混剧烈，污染团在水下充分扩展开，未出现高浓度触顶现象。上述结果表明，在弯道凹岸侧的热浮力排放采用近底水平淹没排放能够更有效利用水体的垂向稀释能力，避免热团过快上升至表面后在弯道环流作用下形成边岸高浓度带堆积。

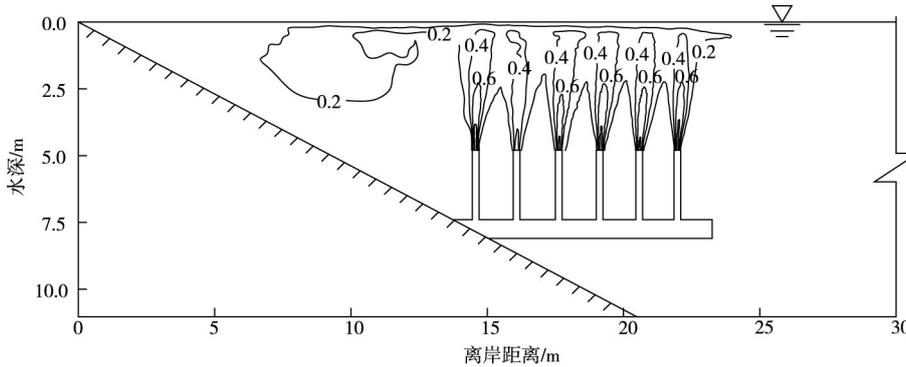


图5 方案1出流横断面(S1断面)浓度分布

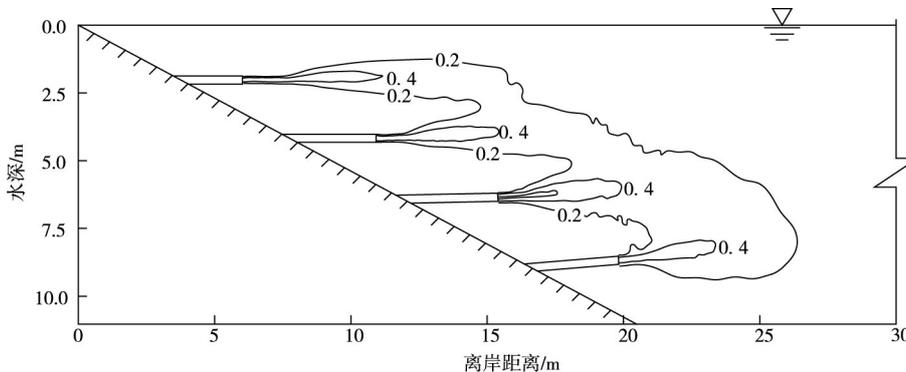


图6 方案2出流横断面(S1断面)浓度分布

3.3 不同水平方位角排放结果比较 根据排放混合区经验数学模型 Cormix 的研究结果^[11]，简化的均匀流条件下，本厂址采用单向出流扩散器，多喷口出流与主流方向一致时初始稀释效果最佳。在模型试验中增加了采用同流向单向出流扩散器，如图8所示方案3。为了比较不同水平方位排放的效

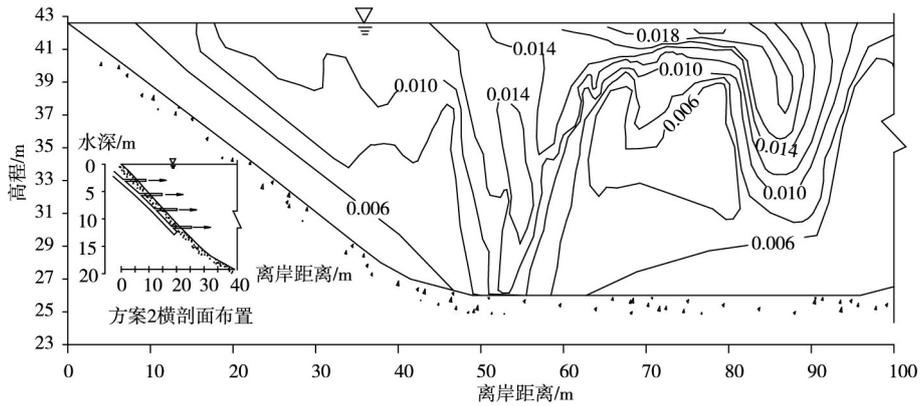


图7 方案2排放口下游S2断面相对浓度分布

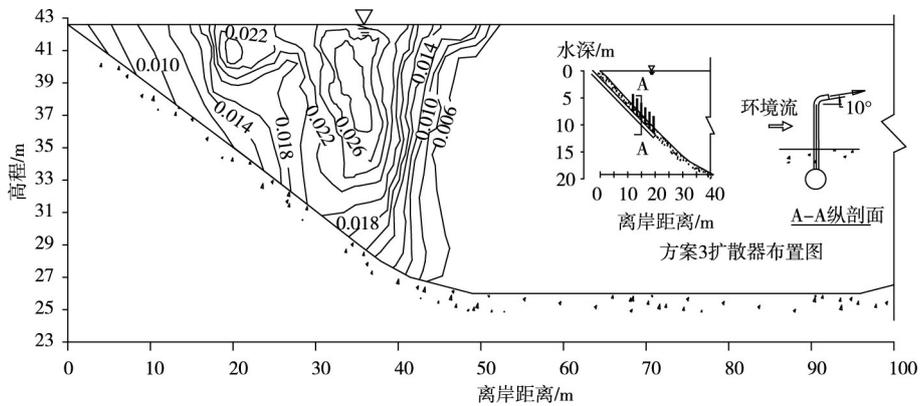


图8 方案3排放口下游S2断面相对浓度分布

果，在排放口下游 50 m(图 1 中所示 S2 断面)采用 PLIF 技术进行了断面浓度测量，由于稀释断面较宽，采用多幅图拼接测量的方法，得到的方案 2 和方案 3 相对浓度分布见图 7 和图 8 所示。图 7 中可以看出方案 2 在 S2 断面处污染带主要分布在离岸约 95 m 范围内，约 1/3 河宽，断面最大相对浓度为 0.020，污染团未触及边岸，但在中心区有较大的回流区，在浮力作用下部分上升至表层的污染团在横向扩展中未到达对岸便出现了下潜，这是浮力流横向扩散作用和弯道表层反向横流作用的综合结果。根据文献[9]的研究结果，弯道分层流横断面上下层会出现 3~4 个旋转方向不同的环流，本次未进行专门的弯道浮力流流动结构研究，但得到的横断面浓度分布也反证了在弯道主环流之外还有局部垂向环流结构存在。图 8 中方案 3 在 S2 断面处污染团主要位于边岸区，未向深水区展开，断面最大相对浓度为 0.028。对比结果表明方案 3 初始稀释效果较方案 2 差，如果要改善出流稀释效果，该方案需要改变扩散器与岸线的夹角，如此要将污染物送入同样等深线区域，则扩散器主管需要加长较多，其经济性不如方案 2。上述模拟结果表明，从模型试验角度得到的最佳排放方位为离岸向与主流垂直排放，这与 Cormix 得到的结果^[11]——同流向单向排放最优并不一致，主要原因是当排放方位与排放口断面流速方向(岸线方向)平行时，受下游地形突然束窄变化影响，射流出流正下游方向底床越来越高，稀释水深越来越小，不利于扩散，这与经验数学模型采用的矩形断面均匀流假定存在较大差异。这说明 CORMIX 模型采用的矩形断面均匀流假定在地形影响较大时偏差较大，而物理模型则能真实反映实际地形变化对近区稀释的影响。

3.4 离岸距离优化结果 当射流出流太靠近表面，一旦在浮力作用下污染团上浮到表层水体，则很难实现充分的垂向掺混稀释，方案 2 最高出流口淹没深度较小，从图 7 中可以看到 S2 断面有部分表层高浓度区和横向不稳定回流，将该方案向离岸方向延伸约 6 m，调整出流高度至最高出流口淹没深度不小于 5 m(图 9 中所示方案 2A)，图 9 中可以看出该方案 S2 断面表层高浓度区消失，断面浓度最大值分布在中层，垂向混合较为充分。表 1 中比较了方案 2 和方案 2A 在 S2 断面上的扩散面积，可以看出

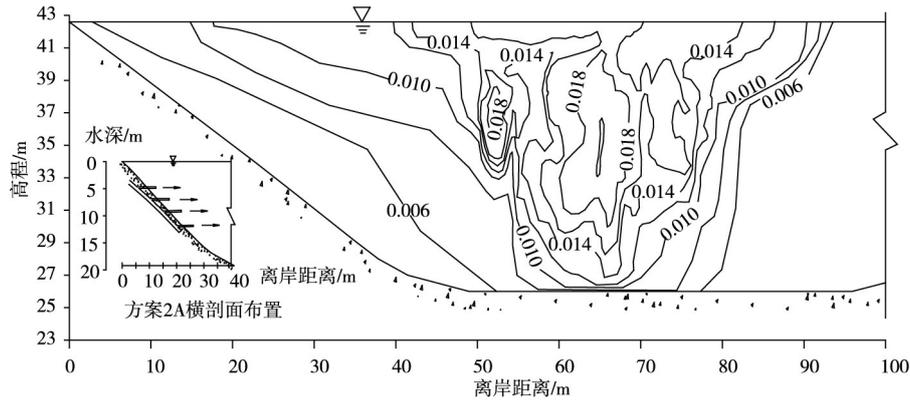


图9 方案2A排放口下游S2断面相对浓度分布

表1 不同方案S2断面浓度扩散面积

排放方案	喷口离岸最远距离/m	支管最小排放水深/m	相对浓度0.02面积/m ²	相对浓度0.01面积/m ²
方案2	20	2.5	2.4	446
方案2A	26	5.0	1.3	529

方案2A相比方案2增大了离岸距离，增加了最小排放水深，对应相对浓度为0.02的扩散范围小于方案2，相对浓度为0.01的扩散范围则大于方案2，方案2A断面稀释更为均匀。因此最终建议以方案2A作为推荐排水型式，支管数量及出流流速等依据水头损失情况可作适当调整。

4 结论

本文采用大型物理模型试验模拟了某内陆核电厂址弯道流条件下热浮力排放扩散器出流近区稀释扩散过程，采用PLIF技术获得了排放出流不同断面处清晰的大范围浓度场分布，在此基础上开展了复杂弯道水域地形条件及流动条件下，排放口初始稀释过程及扩散器型式优化研究。模型试验结果表明：弯道凹岸侧排放存在浮力和弯道环流累加作用，若浮力作用下热污水较快上升至表面，则在弯道表层偏向凹岸侧的表面横流作用下，污染物向对岸的横向扩散会受到抑制，因此宜尽可能采用深水近水平排放以减小热水过快上浮至表面；弯道下游河道急剧束窄情况下，采用顺岸同流向排放时，在射流下游方由于水深变浅稀释能力减弱，易造成高浓度污染带贴岸分布，采用垂直主流朝离岸向的水平出流型式能迅速将污染团送入主流深水区，获得比同流向出流更好的稀释效果，这与Cormix经验模型得到的同流向出流稀释效果最佳存在差异，本次物理模型由于反映了地形变化的影响，与实际更相符。由于弯道流水域的热浮力排放与顺直河道存在较多差异，在扩散器优化研究中弯道环流与浮力射流的综合作用值得引起重视。

参 考 文 献：

- [1] FISCHER H B, et al. Mixing in Inland and Coastal waters[M]. New York: Academic Press, 1979.
- [2] 韦鹤平, 徐连军. 白龙港排放口扩散器工程设计参数的优化[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 71-73.
- [3] 张光玉, 詹水芬, 袁俊岭. 扩散器近区稀释扩散模型试验研究[J]. 交通环保, 2005, 26(1): 1-6.
- [4] 于航, 白景峰, 王心海, 等. 大水深条件下污水排放工程扩散器稀释扩散效果研究[J]. 水道港口, 2013, 34(4): 364-368.
- [5] 陈祖军, 韦鹤平. 城市污水排江工程模型试验的研究[J]. 环境污染与防治, 2001, 23(6): 287-289.
- [6] 槐文信. 扩散器参数对河流中单向性排放近区稀释的影响[J]. 武汉水利水电大学学报, 1997, 30(6): 6-9.
- [7] 陈丽萍, 蒋军成, 韩冬梅. 弯道明渠内危化品泄漏扩散的数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(10):

- 40-44 .
- [8] 倪浩清, 沈永明, 周力行. 明渠弯道中三维浮力湍流流动的数值模拟[J]. 自然科学进展, 1994(3): 300-217 .
- [9] 华祖林, 褚克坚, 邢领航. 强弯条件下分层流运动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 203-209 .
- [10] 赵懿珺, 贺益英, 谭水位, 等. 大范围、高帧频 PLIF 浓度场测量系统的开发及应用[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 67-73 .
- [11] 李俊雄, 陈小莉, 纪平, 等. 内陆核电液态流出物排放口型式优化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(5): 391-396 .

Physical model study on diffuser parameter optimization for thermal buoyant discharge into bend flow

CHEN Xiaoli, KANG Zhanshan, ZHAO Yijun, JI Ping

(Department of Hydraulics China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The outfall of waste discharge into bend flow area is usually located at the cut bank to take full advantage of the spiral flow for fast mixing. While the near field mixing characteristic in bend flow is different from that in straight channel and the related research is rare. In this paper, the near field mixing process of a thermal buoyant discharge by a diffuser into bend flow is simulated using a large scaled physical model. The Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) technology is used to measure the concentration at certain sections. The impact of bend secondary flow on the buoyant jet mixing is analyzed. Then the discharge vertical angle, horizontal direction angle and distance from bank are optimized. At last the diffuser discharge nearly horizontal offshore at different height level is proposed as the most suitable pattern for the thermal buoyant discharge into the bend flow. The research result has reference meaning for diffuser optimization study of similar thermal buoyant discharge into bend river area.

Keywords: PLIF; bend flow; low radio-active effluent; buoyant jet; physical model; diffuser

(责任编辑: 李福田)

(上接第 100 页)

Test study on the tensile stress-deformation curve of fully-graded concrete

ZHANG Yanhong, HU Xiao, YANG Chen

(State Key Laboratory of Simulation Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Tensile stress-deformation curve of fully-graded concrete is very important for the nonlinear response calculation and the critical seismic capability analysis of dams. In this paper, the advanced closed-loop servo testing machine is used to perform the axial tension test on $\Phi 450 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$ cylindrical specimens (max aggregate size of 150 mm) under the control of displacement mode, from which the complete curves of tensile stress versus tensile deformation in given range are obtained. After the maximum load, cyclic loads under different stress levels are applied to study the unloading and reloading curves. Simple equations are suggested to fit the complete stress-deformation curves and the unloading/reloading curves of the fully-graded concrete. This paper provides a reference basis for the dam concrete model building in numerical analysis.

Keywords: hydraulic structure engineering; fully-graded concrete; axial tension test; stress-deformation curve; strain rate

(责任编辑: 王冰伟)