

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.027

“龙抬头”泄洪洞高速水流掺气减蚀研究

詹双桥, 杨志明, 郑洪, 幸添

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410007)

摘要: 高流速泄洪洞易发生空蚀破坏, 甚至威胁建筑物安全, 采用合适的掺气减蚀措施是减免空化、冲蚀破坏有效的技术手段。通过减压模型试验、理论计算分析、工程运用调研, 对涇天河水库“龙抬头”布置的2#泄洪洞高速水流掺气减蚀开展了系统研究, 提出了局部体型改进措施、衬砌平整度控制标准, 及掺气坎布置与体型优化, 简化了衬砌施工工艺, 加快了施工进度, 保证了工程质量。

关键词: 泄洪洞; 高速水流; 空蚀; 模型试验; 掺气坎; 平整度

中图分类号: TV672+.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0155-05

On Air Entrainment and Cavitation Alleviation in High-speed Flow of Inlet-raised Spillway Tunnel

ZHAN Shuangqiao, YANG Zhiming, ZHENG Hong, XING Tian

(Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan, 410007, China)

Abstract: Spillway tunnel with high-speed flow is prone to cavitation damage and eventually threaten structure safety. Appropriate air entrainment and cavitation alleviation measures is an effective techniques to reduce cavitation and erosion damage. Through pressure-reduction model test, theoretical calculation analysis and engineering application investigation, systematic analysis on air entrainment and cavitation alleviation of No.2 spillway tunnel set with inlet-raised section in Centianhe Project were carried out. With the proposed measures of improving of local shape, controls on lining flatness, optimization in aerator layout and shape, the lining construction process was simplified, the construction progress can be accelerated, and at the same time ensure the quality.

Keywords: spillway tunnel; high-speed flow; cavitation; model test; aerator; flatness

高流速、大流量、水流条件复杂的水工隧洞, 当过水边界遇有突变、突体、陡坎及断面急骤变化时, 极易发生空蚀现象, 国内外泄洪洞因高速水流引发空蚀破坏的案例较多^[1-3]。有关研究成果表明^[4-10], 采用适当的掺气措施是减免高速水流出现空化与空蚀破坏最有效的技术手段, 但由于高流速泄洪洞水流条件非常复杂, 难以通过工程类比和计算分析^[11-13]直接确定所有设计参数或工程措施, 包括如何合理确定高流速泄洪洞掺气设施布置、体型、数量、掺气浓度、抗蚀材料、过流面平整度控制标准等。涇天河水库工程2#泄洪洞通过减压模型试验^[14-15]、理论计算分析、工程运用调研等手段开展了掺气减蚀措施的研究。

1 工程概况

涇天河水库扩建工程位于湖南省江华瑶族自治县境内的湘江支流潇水上游。工程以灌溉、防洪、下游补水和发电为主, 兼顾航运, 水库总库容15.1亿m³, 正常蓄水位313 m。为I等大(1)型水利水电枢纽工程。

工程采用两条高低布置的无压流泄洪隧洞宣泄洪水, 其中2#泄洪洞兼顾导流, 采用“龙抬头”布置形式, 缓坡段纵坡2%, 龙抬头段与缓坡段采用反弧相接, 洞身全长770 m, 缓坡段洞身断面尺寸12.0 m × 12.5 m(宽 × 高), 龙抬头段洞身尺寸由18.0 m × 14.2 m渐变至12.0 m × 12.5 m。2#泄洪洞主要特

收稿日期: 2019-02-15

修稿日期: 2019-03-12

基金项目: 湖南省水利科技项目(湘水科计[2012]177-5, 湘水科计[2017]230-28)

作者简介: 詹双桥(1981—), 男, 湖北广水人, 高级工程师, 主要从事水工设计工作。E-mail: 21558127@qq.com

征频率下泄流量见表 1,最大下泄流量 2 878.4 m^3/s ,最大流速 36.65 m/s 。

表 1 2#泄洪洞不同频率的泄洪流量

泄洪工况	库水位 /m	泄洪流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大断面 平均流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
正常蓄水位	313.00	1456.0	35.07
100 年一遇洪水 1.00%	316.61	2164.4	35.92
200 年一遇洪水 0.50%	317.20	2271.9	36.13
5000 年一遇洪水 0.20%	317.76	2388.5	36.19
10000 年一遇洪水 0.01%	320.27	2878.4	36.65

2 空化试验研究

2.1 空化研究原理

水流空化是气泡从发生、发展到溃灭,反复的、随机的、循环过程所表现出来的总体现象。空化时会产生宽频带随机噪声信号,空化噪声信号是空化时声能的随机脉冲辐射,空化的不同强度阶段伴随有不同的噪声辐射能,且不同空化类型所体现的噪声量级和频域不同。因此,根据空化噪声的这些特点,运用声学原理测量方法,可有效地进行水流空化问题的研究分析。

水流中的噪声信号经过分析处理后获得噪声声压谱级(SPL),定义声谱级差值 $\Delta\text{SPL} = \text{SPL}_r - \text{SPL}_0$,其中 SPL_r 为相似气压条件下模型水流中的噪声谱级,而 SPL_0 则为参考背景条件下模型水流中相应的噪声谱级。据总结多年来原型、模型空化问题的研究成果,有如下空化强弱经验判别式:

$$\begin{aligned} \Delta\text{SPL} < 5\text{dB} & \quad \text{无空化} \\ \Delta\text{SPL} \approx 5\text{dB} \sim 10\text{dB} & \quad \text{空化初生阶段} \\ \Delta\text{SPL} > 10\text{dB} & \quad \text{空化发展阶段} \end{aligned} \quad (1)$$

通过式(1)谱级差 ΔSPL 值的量级可用来衡量空化强度,产生空化的类型与 ΔSPL 值分布的频域特性有关。中外学者通过对空化机理和空化噪声的研究发现:空化的声能辐射有低频的空泡振荡分量和高频的尖脉冲分量,对于含气型空化(空泡内气体含量较高),空化的噪声贡献主频一般分布在 80 kHz ~ 63 kHz 及以下的中低频段;而以含汽为主则为蒸汽型空化(液体汽化、空泡“爆炸”性地崩溃而形成的空化),空化的噪声贡献可分布于 80 kHz ~ 200 kHz 及以上的高频段,据此可判断空化类型。

有关研究成果及工程运行经验表明,含气型空化基本不具备空蚀破坏力,而蒸汽型空化达到一定的强度具有空蚀破坏力,是工程上极为关注的一种

空化。

2.2 减压模型

2.2.1 模型设计

模型按重力相似准则设计,采用 1/40 正态局部模型。模型布置在工作宽度和高度分别为 0.80 m 和 3.50 m、试验段总长度 16.0 m 的减压箱中,流量、压力(水柱)和糙率比尺分别为 $Q_r = 10\ 119.3$ 、 $P_r = 40$ 、 $n_r = 1.85$ 。

减压模型满足几何相似、水流运动相似、动力相似及空化相似(空化数相等),空化相似通过减压箱控制相似真空度来实现,模型水面控制的相似气压为:

$$p_a = (P_a - P_v)/L_r + p_v \quad (2)$$

式中: P_a 、 p_a 分别为原型、模型水面的大气压力,Pa; P_v 、 p_v 分别为原型、模型水流相应水温下的汽化压力,Pa; L_r 为模型长度比尺。

2.2.2 测点布置

试验在进口侧缘、检修门槽区域及泄洪洞底板(中心线)布置了时均压力测点进行压力测试。同时在检修门槽下游近区、WES 堰面以及渐变段起始断面和渐变段结束断面这几个区域布置水下噪声传感器接收空化噪声信息。测点具体布置见图 1。

2.3 试验成果

本模型共布置了 5 个水下噪声测点,试验测得的校核洪水位、设计洪水位、防洪高水位和正常蓄水位四工况下有关部位水下噪声谱级。根据水下噪声谱级图可求得 80 kHz ~ 200 kHz 高频段最大谱级差值 $\Delta\text{SPL}_{\text{max}}$,校核洪水位及设计洪水位工况各部位高频段最大谱级差值列于表 2。

表 2 宣泄校核及设计洪水时泄洪洞各部位高频段最大谱级差值

部 位 (水听器号)	$\Delta\text{SPL}_{\text{max}}/\text{dB}$		空化强弱标准/ dB	
	校核洪水	设计洪水	校核洪水	设计洪水
堰顶前部(Z_2)	7	1	< 10	< 5
门槽下游近区(Z_4)	4	1	< 5	< 5
WES 堰面(Z_1)	2	1	< 5	< 5
渐变段起点(Z_6)	3	1	< 5	< 5
渐变段终点(Z_7)	9	6	< 10	< 10

由表 2 可知,低于设计洪水位运行,检修门槽区域、泄洪洞 WES 堰面及洞身渐变段起点区域 80 kHz ~ 200 kHz 高频段最大谱级差值 $\Delta\text{SPL}_{\text{max}}$ 小于 5 dB,表明上述区域水流不会发生蒸汽型空化,校核洪水位下堰顶前部区域出现 80 kHz ~ 200 kHz 高频段最

大谱级差值 ΔSPL_{max} 大于 5 dB 但小于 10 dB 的空化噪声,表明水流在该区域已发生初生阶段空化,但不

会出现空蚀破坏。

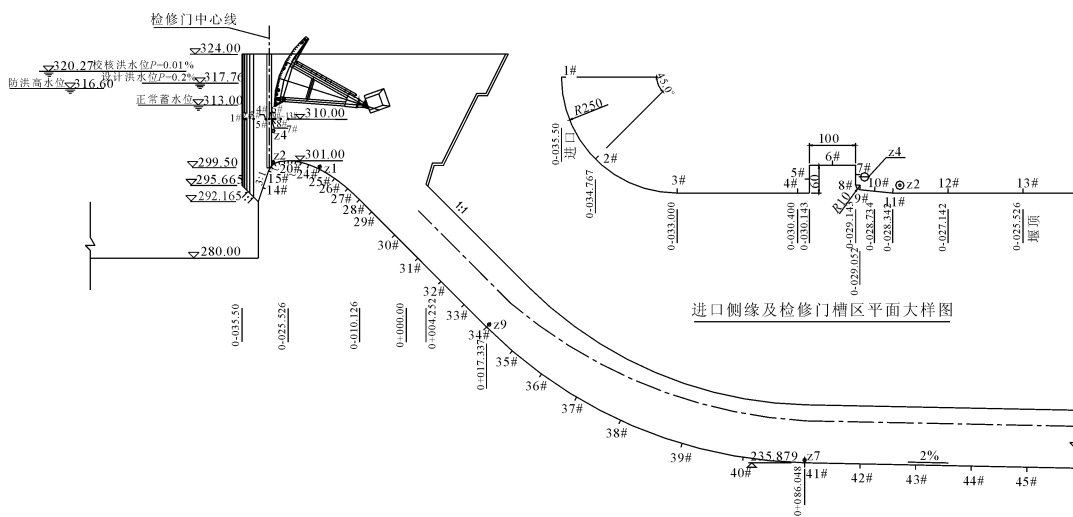


图 1 测点布置图

设计洪水位及校核水位下运行,洞身渐变段终点(缓坡段起点)区域出现 80 kHz ~ 200 kHz 高频段最大谱级差值 ΔSPL_{max} 大于 5 dB 但小于 10 dB 的空化噪声,表明水流在该区域已发生初生阶段空化。

2.4 减蚀措施

根据试验数据,计算了校核洪水位条件下泄洪洞堰面和洞身压力较低或流速较高的五个断面的水流空化数见表 3。

表 3 宣泄校核洪水时泄洪洞典型断面水流空化数 σ

断面	0 - 025.526 (堰顶)	0 - 021.126 (最低压力断面)	0 + 017.337 (渐变段起点)	0 + 086.048 (渐变段终点)	0 + 106.048 (缓坡段)
$P/(9.81kPa)$	- 0.944	- 2.824	7.356	9.856	7.256
$V/(m \cdot s^{-1})$	12.850	14.870	28.590	36.650	33.940
σ	1.076	0.637	0.417	0.317	0.294

注: P 为断面测点压力; V 为断面平均流速。

从表 3 可知,渐变段末端试验流速超过 35 m/s,其后缓坡段水流空化数 $\sigma < 0.300$,该处需设置掺气坎。龙抬头下游缓坡段水面沿程壅高,流速逐渐减小,渐变段末端下游 180 m 处最大流速降低至 33 m/s 以下。

缓坡段纵坡 2%,工程经验表明,较小底坡情况下若掺气坎体型设置不当,起不到掺气效果时,回水淹没掺气槽,掺气坎本身可能成为空化源,进而会威胁泄洪洞的安全运行,因此,2# 泄洪洞仅在龙抬头末端设置一道掺气坎,对缓坡段上游出现空化可能性较大的部位进行掺气保护,并加强缓坡段过流表面平整度控制以降低空蚀破坏风险。

3 掺气形式选择

前期设计中,2# 泄洪洞沿线共设置 9 道掺气坎,通过试验研究及工程运用调研,仅保留龙抬头末

端一道掺气坎。掺气设施布置及体型根据工程经验并结合本工程实际拟定,通过模型试验验证效果后确定最优方案。

2%缓坡段是由原导流洞改建,洞身尺度已定,为避免掺气设施对水流产生过大的扰动,过分的抬高坎后水面线,过多增加工程扩挖量,掺气设施首先考虑通过调整泄洪洞反弧段(即渐变段)底板圆弧半径,在渐变段与缓坡段衔接处(桩号 0 + 086.05)自然形成一个跌坎,进行掺气。

3.1 体型 I

将泄洪洞反弧段(即渐变段)底板圆弧半径由 $R = 100$ m 修改为 $R = 103.88$ m,使得在渐变段与缓坡段衔接处(0 + 086.048 m 断面)形成一个 1.5 m 高跌坎,坎下洞身两侧壁各设置一个 1.5 m × 1.0 m (长 × 高)的通气孔,掺气坎及通气孔局部尺寸见图 2,掺气坎区域流态见图 3。

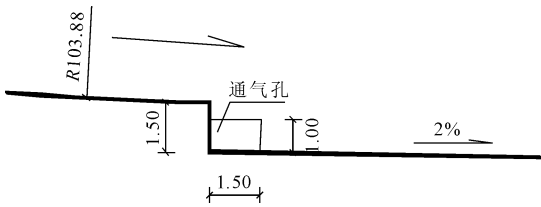


图 2 体型 I 掺气坎及通气孔型式(单位:m)

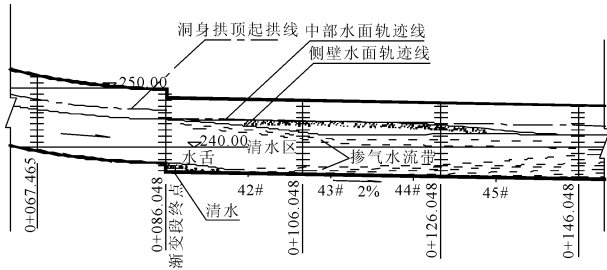


图 3 体型 I 掺气坎区域流态示意(校核洪水位)(单位:m)

试验表明,体型 I 掺气坎可在射流水舌落点后形成覆盖洞身底板的近 100 m 稳定掺气水流带,但坎后射流水舌下未形成稳定空腔,为使工程更加安全可靠,对掺气坎体型进行修改。首先考虑保持龙抬头反弧段底板圆弧半径与体型 I 相同,仅对掺气坎局部体型进行修改解决掺气空腔问题。

3.2 体型 I - 1

2%的缓坡使得水舌与底板夹角较大,导致较强烈的水流反向旋滚,因此在水舌落点区域设置一贴坡,使该区域底板坡度变为 7.2%,目的就是减小入射水流与底板的夹角。体型 I - 1 的布置型式见图 4,掺气坎区域流态见图 5。

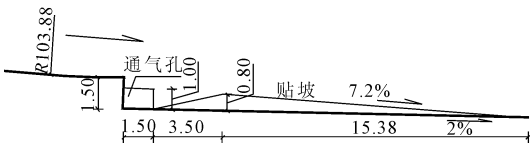


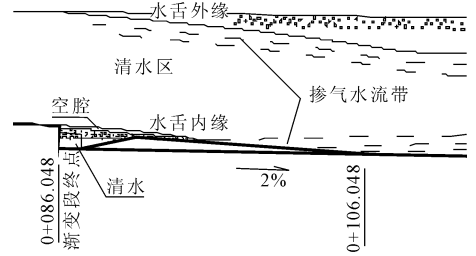
图 4 体型 I - 1 布置型式(单位:m)

试验结果表明,体型 I - 1 优于体型 I,显然使水舌尽量多的落在较陡的贴坡上有利于空腔的形成。但体型 I - 1 掺气坎在高于设计水位运行时水舌下仍不能出现稳定空腔,因此尝试继续调整掺气坎形式解决回水及掺气空腔的问题。

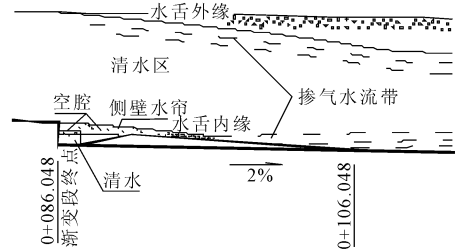
3.3 体型 II

根据上述研究确定掺气坎体型进一步修改思路:(1) 1.5 m 高跌坎+坎后贴坡(0.8 m 高、坡度为 7.2%)的掺气坎体型无法使所有水位下均形成稳定空腔,因此需将跌坎高度以及贴坡高度适当提高,并适当加大斜坡坡度;(2) 对于在 2%的缓坡上设置掺气坎,在坎后加设贴坡使水舌落点落在坡度较陡的

贴坡上,有利于空腔的形成,但也带来通气孔进水不易排干的问题,因此体型 II 将通气孔抬高,使通气孔高于贴坡顶,解决通气孔被水淹没的问题;(3) 根据设计规范要求最大通气风速应小于 60 m/s,按单宽 14 m³ 掺气量估算,通气孔面积应大于 2 m × 1.4 m。为避免过多增加坎高,尽量减小通气孔孔高,取孔高为 0.8 m,则宽度应大于 1.75 m。



(a) 防洪高水位



(b) 正常蓄水位

图 5 体型 I - 1 掺气坎区域流态示意(单位:m)

综合考虑上述因素,体型 II 采用 2.0 m 跌坎+坎后约 1.0 m 高平台+坡度较陡斜坡与 2%缓坡衔接的混合式掺气坎型式。

修改泄洪洞反弧段(即渐变段)底板圆弧半径,由原设计 $R = 100$ m 修改为 $R = 105.17$ m,在渐变段与缓坡段衔接处(0+086.048 m 断面)形成一个 2.0 m 高跌坎,坎下洞身两侧壁各设置一个 1.9 m × 0.8 m(长×高)的通气孔,通气孔布置在高度为 1.0 m 左右的平台上,平台高程为 236.779 m,平台长度经过试验确定为 8.0 m,平台后与原导流洞 2%的缓坡相接的斜坡坡度经试验确定为 10.3%,10.3%斜坡与 2%缓坡交汇处采用 $R = 18.461$ m 的圆弧顺滑衔接,以避免该处出现水流空化。此掺气坎体型简称为体型 II。

2# 泄洪洞设置体型 II 掺气坎掺气坎及通气孔局部尺寸见图 6,试验观测了库水位为正常蓄水位、防洪高水位、设计洪水位及校核洪水位时泄洪洞泄流流态。各水位条件下掺气坎区域流态见图 7。

试验资料表明,体型 II 各级水位下跌坎后的射流水舌下均能形成稳定的空腔,并且空腔尺度较大;坎后底部水流掺气情况良好,可观察到覆盖洞底板

的雾状掺气水流带延伸至坎下射流落点后约 100 m 范围以上。

4 平整度控制

控制高速水流泄洪洞过流面平整度是减少空蚀破坏的有效途径之一,国内外对过流面平整度控制尚无统一的标准,大多是根据不同的流速提出相应的凸起高度和坡度控制标准。本工程通过工程运用调研,提出了如下控制标准:不平整部位高差控制在 3 mm 以内,凸起进行打磨,纵向坡度控制在 1:40,横

向坡度控制在 1:30。

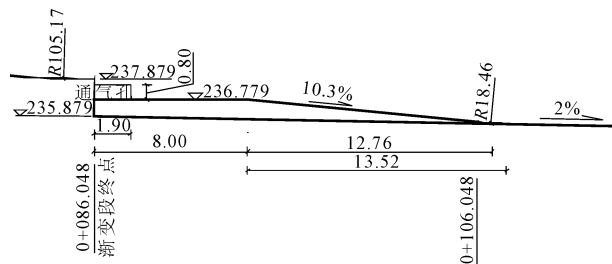


图 6 体型 II 掺气坎及通气孔布置型式(单位:m)

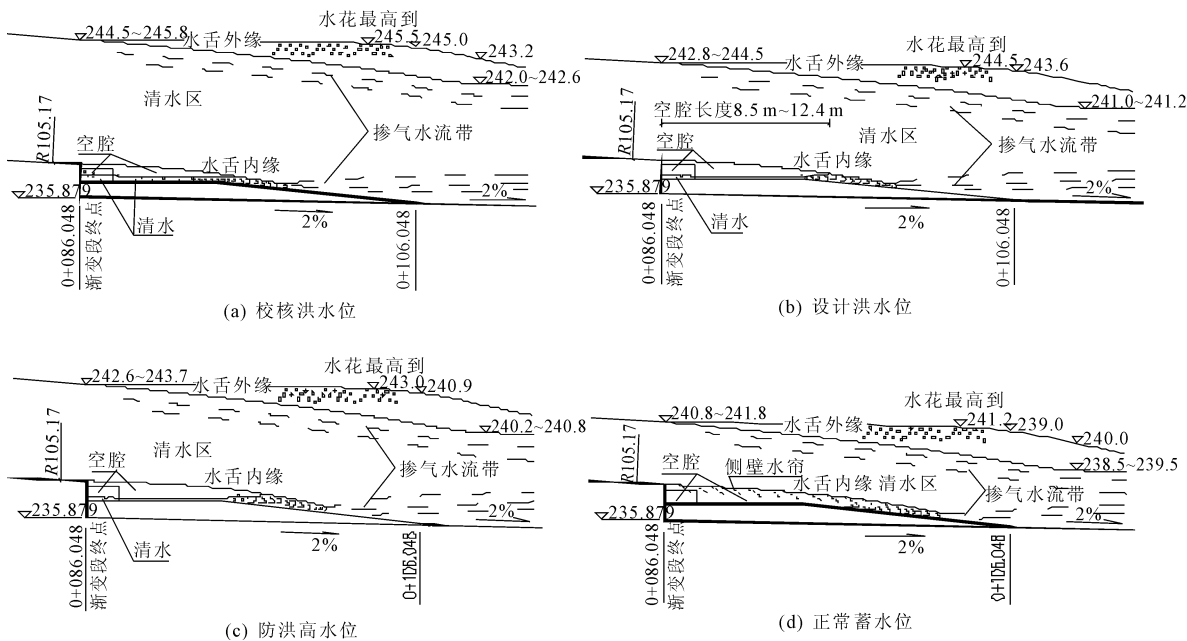


图 7 体型 II 掺气坎区域流态示意(单位:m)

5 结论

(1) 不设掺气坎时,2#泄洪洞在设计洪水位及以下水位运行时,泄洪洞检修门槽区以及表孔堰面和洞身渐变段出口区域均未有蒸汽型空化发生;校核洪水位下运行时,堰顶前部及洞身渐变段终点(缓坡段起点)该区域发生初生阶段空化,但不会出现空蚀破坏。

(2) 2#泄洪洞在校核洪水位下运行时,渐变段末端流速超过 35 m/s,其后缓坡段有小于 0.300 的水流空化数出现,该处需设置掺气坎,并注意在施工中控制洞身的不平整度。经过试验优化,在渐变段末端设置体型 II 掺气跌坎,各级水位下跌坎后的射流水舌下均能形成稳定的空腔,坎后底部水流掺气情况良好。

(3) 通过研究,涿天河水库工程 2#泄洪洞减少了掺气坎数量,优化了掺气坎布置,选择了与“龙抬头”布置相适应的掺气坎体型,简化了衬砌施工工

艺,加快了施工进度,保证了工程质量。

参考文献:

- [1] 水工设计手册第 6 卷:泄水与过坝建筑物[M]. 2 版.北京:中国水利水电出版社,2013.
- [2] 郭军,张东,刘之平,等.大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J].水利学报,2006,37(10):1193-1198.
- [3] 中国科学院水工研究室译.高速水流论文译丛:第一辑第一册[M].北京:科学出版社,1958.
- [4] 朱春英,凌霄,刘杰,等.小浪底工程明流洞掺气减蚀设计研究[J].水力发电,2001(2):23-26.
- [5] 李静,胡国毅.泄洪洞掺气减蚀设施空腔回水研究[J].长江科学院院报,2013,30(8):50-53.
- [6] 蒙富强.长河坝水电站泄洪洞掺气减蚀设施设计[J].水力发电,2016,42(10):36-38.
- [7] 梁尚英.泄洪洞掺气减蚀探讨[J].水利规划与设计,2017(4):51-54.

从图 8 可以看出,机制砂中石粉的含量对于 C50 机制砂混凝土的耐久性影响不大。

从以上研究结果中可以看出,石粉含量对于 C30 和 C50 机制砂混凝土的耐久性的影响有很大的区别,这主要是由于石粉对于两类混凝土的空隙率影响不同,从而导致了不同强度的混凝土的耐久性性能的影响规律不同。

6 结 论

通过上述研究得出,机制砂混凝土的扩展度随石粉含量的增加而减小,坍落度在石粉含量 10% ~ 15% 和 5% ~ 7% 之间时较好,利用这个影响机制调整机制砂中的石粉含量达到适量可以改善机制砂混凝土的工作性能。对于石粉含量在 20% 以下的 C30 机制砂混凝土和石粉含量在 15% 以下的 C50 机制砂混凝土,随着石粉含量的增加,机制砂混凝土强度有较小的提高。从对机制砂混凝土抗压强度的影响可以看出,C30 和 C50 机制砂混凝土的最佳石粉含量分别约为 15% 和 10%。这表明对机制砂混凝土强度而言,也存在最佳的石粉含量,不同的机制砂混凝土强度等级对应了不同的机制砂石粉含量。C30 在 10% ~ 15% 左右,C50 在 7% ~ 10% 左右。但石粉含量对机制砂混凝土的长期强度基本没有影响。石粉含量对混凝土耐久性有一定的影响,对 C30 混凝土的耐久性性能提高,C50 混凝土的耐久性影响不大。

参考文献:

[1] 国家建委四局建筑科学研究所.山砂混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.
[2] 吴明威,付兆岗,李铁翔,等.机制砂中石粉含量对混凝土性能影响的试验研究[J].铁道建筑技术,2000(4):

46-49.

[3] 郑金炎,吴跃群.人工砂在商品混凝土中的应用[J].建材技术与应用,2004(6):32-33.
[4] 李亚杰,方坤河.建筑材料[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
[5] 陈家珑.人工砂—新型建筑用砂[J].新型建筑材料,2002(6):32-34.
[6] Tahir Celik, Khaled Marar. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996,26(7):1121-1130.
[7] Ahmed A E, El - Kourad A A. Properties of concrete incorporating natural and crushed stone very fine sand[J]. ACI Materials Journal, 1989,86(4):417-424.
[8] Tahir C, Knaled M. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996,26(7):1121-1130.
[9] Nam - Shik Ahn. An Experimental Study on the Guidelines for Using Higher Contents of Aggregate Micro Fines in Portland Cement Concrete[D]. USA: The University of Texas, 2000.
[10] Sahu A K, Sunil Kumar, Sachan A K. Crushed stone waste as fine aggregate for concrete[J]. The Indian Concrete Journal, 2003,77(1):845-848.
[11] 王稷良.机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
[12] 李婷婷,王稷良,郑国荣,等.机制砂中石粉含量对混凝土抗渗性能的影响[J].混凝土,2009(3):35-37.
[13] 李婷婷,王稷良,郑国荣,等.机制砂中石粉含量对混凝土抗渗性能的影响[J].混凝土,2009(3):35-37.
[14] 王稷良,牛开民,刘 英,等.机制砂中石粉对混凝土性能影响的研究现状[J].公路交通科技,2008,25(9):302-307,322.
[15] 李兴贵.高石粉含量人工砂在混凝土中的应用研究[J].建筑材料学报,2004,7(1):66-71.

(上接第 159 页)

[8] 焦爱萍,张春满,刘宪亮.溪洛渡泄洪洞掺气减蚀设施及体型优化的试验研究[J].灌溉排水学报,2008,27(2):70-73.
[9] 吴伟伟,吴建华,阮仕平.平底泄洪洞掺气设施体型研究[J].水动力学研究与进展,2007,22(4):397-402.
[10] 于 野,刘亚坤,倪汉根,等.洞式溢洪道掺气减蚀设施的体型优化研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):7-9.
[11] 南 洪,贺 威,韩鹏辉,等.查日扣水电站竖井旋流泄洪洞水力学数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):204-207.

[12] 翟保林,刘亚坤.高水头明流泄洪洞三维数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):31-34.
[13] 徐国宾,章环境,刘 昉,等.龙抬头泄洪洞水力特性的数值模拟[J].长江科学院院报,2015,32(1):84-87.
[14] 长江水利委员会长江科学院.涪天河水库扩建工程 2# 泄洪洞体型布置调研报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2013.
[15] 长江水利委员会长江科学院.涪天河水库扩建工程 2# 泄洪洞局部体型减压模型试验研究报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2013.