



富春江船闸改造工程消能区围堰 水力原型观测与研究

楼伟中^{1,2}, 王 恕^{1,2}, 刘传新^{3,4}, 王甘林^{3,4}

(1. 富春江船闸扩建改造工程建设指挥部, 浙江 杭州, 311504; 2. 杭州市港航管理局, 浙江 杭州, 310014;
3. 苏文科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112; 4. 江苏省地下空间探测技术工程实验室, 江苏 南京 211112)

摘要: 富春江船闸扩建改造工程在运行水电枢纽工况下进行, 施工围堰在地质条件复杂的泄洪区内, 防渗技术难度大。对已完工程围堰防渗施工及处理方法进行介绍, 通过对过流围堰的原型观测, 获得了迎水面水流流速、冲击压力、脉动荷载等水力参数。

关键词: 船闸围堰; 水力原型观测; 水力特性

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0106-04

Observation of the hydraulic prototype in the energy dissipation zone cofferdam of the Fuchunjiang ship lock expansion and renovation project

LOU Wei-zhong^{1,2}, WANG Shu^{1,2}, LIU Chuan-xin^{3,4}, WANG Gan-lin^{3,4}

(1. Fuchunjiang Ship Lock Expansion and Renovation Project Construction Headquarters, Hangzhou 311504, China;

2. Hangzhou Port and Shipping Authority, Hangzhou 310014, China;

3. Jiangsu Transportation Institute Group Co., Ltd., Nanjing 211112, China;

4. Jiangsu Underground Reconnaissance Technology Engineering Laboratory, Nanjing 211112, China)

Abstract: Fuchunjiang ship lock expansion and renovation project is carried out under the working condition of the hydropower hinge. Due to the complex geological conditions of the flood discharge area, there are great difficulties in seepage control technology. This paper introduces the control construction and treatment methods of the completed cofferdam seepage. Positive side flow velocity, impact pressure, pulsating loads and other hydraulic parameters are collected through prototype observation of overcurrent cofferdam.

Keywords: ship lock cofferdam; hydraulic prototype observation; hydraulic characteristics

富春江船闸扩建改造工程是国内首个在运行水电枢纽下改建的碍航船闸工程, 施工期枢纽正常运行, 日调节水库没有调峰能力, 日常发电时每天水位变幅在 6 m 左右 (满发时 9.5 m, 停发时 3.2 m 上下), 2a 一遇洪水时坝下水位 13.4 m。施工围堰部分处于泄洪主消能区, 尤其围堰端头正

对 14#~17#泄洪闸, 距坝仅 30 m, 过闸高速水流的强烈冲击、脉动、冲刷以及水位陡升陡降反复水压力作用对主体围堰结构安全构成极大的威胁, 在目前缺乏相关工程经验的情况下, 通过施工围堰的水力原型观测, 掌握围堰迎水面水流流速、冲击压力、脉动荷载等水力参数^[1]。

收稿日期: 2016-06-02

作者简介: 楼伟中 (1970—), 男, 教授级高工, 注册土木工程师 (港航)、注册一级建造师 (港航、桥梁、房建)、全国注册咨询、造价、监理工程师, 从事港口及航道工程的研究。

1 监测方法

1.1 测点布置

施工围堰水力原型观测的测点布置在直接受水流冲击的顶冲段 0-070~0+000 范围内。测点平面布置见图 1, 测点沿围堰中轴线方向在迎水面布置两排, 每排 3 个共 6 个测点, H1(H4)、H2(H5) 分别正对 17#、15#泄水闸闸孔中心, 均处于圆弧段, H3(H6)位于圆弧段末端, 对应桩号为0+000。每个测点测量水流流速、脉动压力及冲击压力。

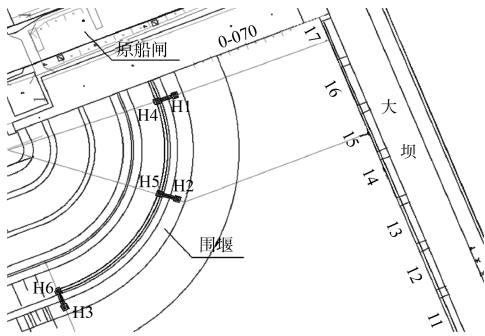


图 1 围堰测点布置

1.2 监测设备

因围堰距离泄水闸距离较近, 且位于主消能区, 相应泄水闸开启时过流流速已超过 10 m/s, 采用常规的传感器无法满足量程、安装等测试要求。因此, 仪器设备必须稳定, 且满足高强度抗冲击要求^[2-3]。

本次观测中, 流速选择差压式流速仪, 冲击压力采用稳定性较好的压力计测量, 脉动压力采用灵敏度高、量程大的压阻式脉动压力传感器测量。传感器在高速水流冲击下极易进水失效及冲毁, 如何进行抗冲击及防水保护是一个难点。经多次试验, 最终采用高强度防护壳对传感器封装的方法施以保护, 各连接处采用防水胶密封。各类传感器输出的电压信号经 YD-28A 动态应变仪放大滤波后, 由高频、大容量的 INV DASP 信号采集分析系统采集处理。

1.3 设备安装

过流围堰引水面为斜坡, 斜坡上有较多的石块、大木块, 且混凝土面板表面存在浮浆, 因此若将监测仪器、布线暴露在外, 被冲毁的风险极大。故本次观测传感器安装方法是在围堰钢筋混凝土面板上开槽, 利用钢筋固定传感器及管线, 最后浇筑混凝土固结^[4]。具体实施过程如下: 开槽、仪器埋设固定、设备调试、混凝土浇筑、养护保护^[5]。

2 采集工况

2.1 泄洪典型工况

对施工围堰结构安全最不利的典型工况是开启 14#~17# 闸孔泄洪。2015 年 6 月 10 日, 分别对 14#~17# 闸孔进行了开启泄洪, 工况见表 1。

表 1 泄洪工况

日期	工况编号	闸门开启方式	上游水位/m	下游水位/m	入库流量/ (m ³ /s)	出库流量/ (m ³ /s)	泄洪流量/ (m ³ /s)
06-10	fej1	1#~3#局开 4 m、4#~10#局开 5 m、11#~13#局开 4 m、14#全开、15#~17#关闭	22.68	12.87	8 990	9 440	7 900
	fej2	1#~3#局开 4 m、4#~10#局开 5 m、11#~13#局开 4 m、14#关闭、15#全开、16#~17#关闭					
	fej3	1#~3#局开 4 m、4#~10#局开 5 m、11#~13#局开 4 m、14#~15#关闭、16#全开、17#关闭	22.63	13.10	8 990	9 480	7 930
	fej4	1#~3#局开 4 m、4#~10#局开 5 m、11#~13#局开 4 m、14#~16#关闭、17#全开	22.56	13.22	9 080	9 400	7 910
	fej5	1#~7#局开 4 m、8#~10#局开 5 m、11#~13#局开 4 m、14#~17#关闭	22.73	12.76	9 030	8 700	7 110
06-11	fej6	1#~4#局开 4 m、5#~8#局开 6 m、9#~12#局开 4 m、13#局开 2 m、14#~17#关闭	22.44	12.09	8 020	8 160	7 250

2.2 水流流态

通过目测泄洪闸前水流流态, 14[#]~17[#]闸孔中, 仅14[#]闸孔全开时, 因下游水位较高、围堰区回流较大, 14[#]闸孔主流向河道中心偏斜, 并未能直接作用于围堰上。14[#]~17[#]闸孔中, 仅15[#]闸孔全开时, 16[#]、17[#]闸孔区域仍为回流, 15[#]闸孔主流可以冲击至围堰。14[#]~17[#]闸孔中, 仅16[#]闸孔全开时, 围堰区已基本无回流, 直接受到16[#]闸孔主流淹没冲击。14[#]~17[#]闸孔中, 仅17[#]闸孔全开时, 围堰受水流冲击距离最短, 围堰上部冲击也最为强烈, 过流流速较大。

3 围堰水力特性

3.1 水流流速

流速平均值见表2。

表2 围堰流速平均值

工况	闸门开启方式	测点	平均流速/(m/s)
fcj1	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 闸门全开、15 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	4.72
		H2(H5)	4.69
		H3(H6)	7.07
fcj2	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 、16 [#] 、17 [#] 关闭、15 [#] 全开	H1(H4)	5.23
		H2(H5)	6.75
		H3(H6)	5.13
fcj3	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 、15 [#] 、17 [#] 关闭、16 [#] 全开	H1(H4)	8.50
		H2(H5)	6.23
		H3(H6)	5.20
fcj4	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~16 [#] 关闭、17 [#] 全开	H1(H4)	11.86
		H2(H5)	8.93
		H3(H6)	7.40
fcj5	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	2.26
		H2(H5)	2.78
		H3(H6)	3.55
fcj6	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	2.04
		H2(H5)	2.25
		H3(H6)	3.06

1) 工况 fcj1 受 14[#] 闸孔主流影响, 围堰圆弧段末端 H3(H6) 测点处流速相对最大, 为 7.07 m/s, 围堰圆弧段则处于回流区, 回流流速低于 5 m/s。2) 工况 fcj2 受 15[#] 闸孔主流的冲击, H2(H5) 测点处流速相对最大, 为 6.75 m/s。3) 工况 fcj3 受 16[#] 闸孔主流的冲击, H1(H4) 测点处流速相对最大, 为 8.50 m/s。4) 工况 fcj4 受 17[#] 闸孔主流近

距离冲击, H1(H4) 测点处流速达 11.86 m/s。5) 工况 fcj5、fcj6 未受 14[#]~17[#] 闸孔水流影响, 围堰圆弧段均处于回流区, 回流流速低于 3 m/s, 围堰圆弧段末端 H3(H6) 测点处流速相对最大, 为 3.06 m/s。

3.2 动水压力

典型工况围堰动水压力特征值见表3。

表3 围堰动水压力特征值

工况	闸门开启方式	测点	脉动压力/kPa		冲击压力/kPa	
fcj1	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 闸门全开、15 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	0.32	3.136	1.06	10.388
		H2(H5)	0.20	1.960	1.01	9.898
		H3(H6)	0.58	5.684	1.14	11.172
fcj2	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 、16 [#] 、17 [#] 关闭、15 [#] 全开	H1(H4)	0.40	3.920	2.20	21.560
		H2(H5)	1.04	10.192	2.42	23.716
		H3(H6)	0.50	4.900	1.27	12.446
fcj3	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] 、15 [#] 、17 [#] 关闭、16 [#] 全开	H1(H4)	1.40	13.720	3.52	34.496
		H2(H5)	1.37	13.426	3.33	32.634
		H3(H6)	0.48	4.704	1.30	12.740
fcj4	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~16 [#] 关闭、17 [#] 全开	H1(H4)	2.31	22.638	8.21	79.380
		H2(H5)	0.62	6.076	3.04	29.792
		H3(H6)	0.64	6.272	1.53	14.994
fcj5	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	0.25	2.450	0.90	8.820
		H2(H5)	0.18	1.764	0.84	8.232
		H3(H6)	0.44	4.312	1.02	9.996
fcj6	1 [#] ~13 [#] 局开、14 [#] ~17 [#] 关闭	H1(H4)	0.22	2.156	0.83	8.134
		H2(H5)	0.16	1.568	0.72	7.056
		H3(H6)	0.38	3.724	0.94	9.212

1) 工况 fcj1、14[#] 闸孔全开时, 因未直接受到主流冲击, 围堰脉动压力和冲击压力均较小, 最大脉动压力均方根值为 5.684 kPa, 冲击压力最大为 11.172 kPa。

2) 工况 fcj2、15[#] 闸孔全开时, 受 15[#] 闸孔主流的冲击, H2(H5) 测点处脉动压力和冲击压力相对较大, 分别为 10.192 kPa, 冲击压力最大为 23.716 kPa。

3) 工况 fcj3、16[#] 闸孔全开时, 受 16[#] 闸孔主流的冲击, H1(H4) 测点处脉动压力和冲击压力相对较大, 分别为 13.72 kPa, 冲击压力最大为 34.496 kPa。

4) 工况 fcj4、17[#] 闸孔全开时, 受 17[#] 闸孔主流近距离冲击, H1(H4) 测点处最大脉动压力均方根值为 22.638 kPa, 冲击压力最大达 79.38 kPa。

5) 工况 fcj5、fcj6 由于未受 14#~17# 开闸影响,脉动压力和冲击压力都相对较小,最大脉动压力均方根值为 4.312 kPa,冲击压力最大为 9.996 kPa。

3.3 成果分析

影响围堰安全的因素主要有过堰单宽流量 q 、上下游水位差 Z 、围堰下游边坡坡度 m 及边坡平整度等,各因素的共性是对过流流速产生影响,而作用于围堰上的水力荷载又与过流流速密切相关^[6]。因此,可通过建立水力荷载与过流流速间相关关系,对围堰水力特性进行预测分析,为类似围堰的设计、安全评判提供科学依据。

脉动压力、冲击压力与流速的拟合关系曲线见图 2、3。可见脉动压力、冲击压力均与流速成良好的二次正相关关系,流速越大,动水压力越大。

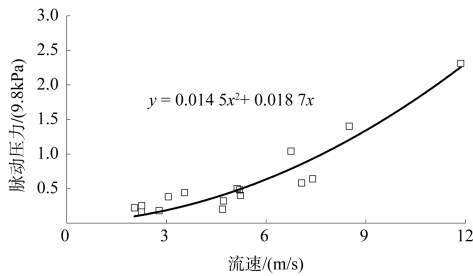


图 2 脉动压力与流速关系

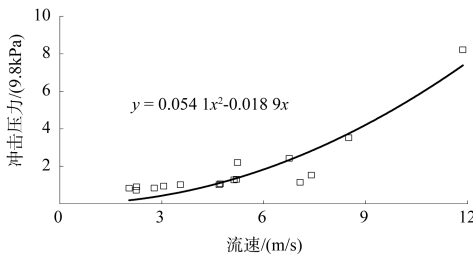


图 3 冲击压力与流速关系

其经验公式如下:

$$P_{\text{脉}} = 0.0145v^2 + 0.0187v \quad (1)$$

$$P_{\text{冲}} = 0.0541v^2 - 0.0189v \quad (2)$$

式中: $P_{\text{脉}}$ 为脉动压力均方根; $P_{\text{冲}}$ 为冲击压力; v 为过流流速。

4 结语

1) 水流流态流速方面,仅开启 1#~14# 闸孔

时,顶冲段及纵向围堰迎水面均不受主流冲击,围堰过水时行进流速较小;围堰内水位较高,围堰内外水位差小,过堰水流以缓流状态进入围堰内,因此围堰背水面也较为安全。

2) 当开启 15#~17# 闸孔时,顶冲段受到主流冲击。其中 17# 闸孔工况水流冲击最为强烈,以此最不利工况进行分析。该工况下,下游水位达 13.22 m,泄洪流态为典型的面流流态,下泄主流被戽斗挑至水面,利用主流的表面扩散、戽斗旋滚和表面旋滚进行消能。围堰顶冲段直接受到主流冲击,过堰流速近 12 m/s,但水流消能区主要在表面,堰脚处的格宾石笼、预制沉箱距水流表面近 10 m,受冲击影响较弱,保证了围堰主体结构的安全。围堰背水面也同样如此,围堰内水垫较深,坡面、坡脚均远离表面主流,基本不会发生破坏。

3) 动水压力方面,围堰迎水面位于面流主消能区,承受高速水流的冲击、脉动等水压力作用。实测迎水面冲击压力为 79.38 kPa,最大脉动压力均方根值为 22.54 kPa,考虑 3 倍均方根值的瞬时最大压力约为 0.15 MPa,远小于 0.6 m 厚钢筋混凝土的强度,围堰迎水面一般不会发生劈裂或掏蚀,可以承受水流冲击。

参考文献:

- [1] 金国强.富春江船闸扩建改造工程施工图设计(I 设计说明书)[R].杭州:浙江省交通规划设计研究院,2012.
- [2] 张公略,孙国洪.富春江船闸扩建改造工程施工导流及围堰方案论证[J].水运工程,2014(10):115-120.
- [3] 涂伟成,杨明波.坝下泄洪顶冲区大型围堰施工关键技术[J].建材世界,2015(1):41-45.
- [4] 涂伟成,刘松,张明雷.富春江船闸大体积混凝土温度及裂缝控制技术[J].混凝土世界,2015(10):78-83.
- [5] 唐蔚东,杨明波,涂伟成.富春江船闸扩建改造工程围堰施工技术[J].水运工程,2015(8):66-70.
- [6] 胡志根,胡建民,李燕群.过土石围堰下游护坡的溢流设计风险率模型[J].水科学进展,2003,14(5):622-625.