



中高水头枢纽船闸改扩建工程围堰设计技术

孙万通, 张公略, 李浙江

(浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 根据富春江船闸扩建改造工程, 从设计角度对中高水头枢纽船闸改扩建工程围堰的导流标准、总体布置及结构设计进行重点研究。在兼顾防洪、发电、河道变化等需求前提下研究确定围堰枯水期防洪等级, 结合船闸水工建筑物布置优化调整围堰总体布置方案, 并根据坝下围堰不同区段提出不同结构形式的过水围堰, 为类似的中高水头枢纽船闸改扩建工程围堰设计提出新设计理念和思路, 为多样性的围堰工程增加新特点。

关键词: 船闸; 施工导流; 过水围堰; 坝下消能; 防冲; 防渗

中图分类号: U 641.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0136-07

Design technique for cofferdam of medium-high-head ship lock reconstruction & extension project

SUN Wan-tong, ZHANG Gong-lue, LI Zhe-jiang

(Zhejiang Provincial Planning, Design&Research Institute of Communications, Hangzhou 310006, China)

Abstract: According to Fuchunjiang river lock reconstruction project, we probe into the diversion standard for the medium-high-head hydraulic lock's cofferdam expansion project, the overall layout and structural design from the design point. Under the prerequisite of satisfying the demand of flood-control, power generation and channel variation, we determine the dry season flood control level of the cofferdam. Combining with the arrangement of the lock's hydraulic structure, we optimize the overall layout scheme for the cofferdam, and propose overfall cofferdams of different structural types for different sections of cofferdam, to serve new design ideas and train of thought for the design of similar high-head lock reconstruction project's cofferdam, and add new features for the cofferdam engineering.

Keywords: ship lock; construction diversion; cofferdam over water; energy dissipation under dam; scour protection; seepage control

1 船闸扩建改造工程概况^[1]

富春江船闸扩建改造工程位于钱塘江中下游桐庐县富春江水电站东侧, 距下游杭州市约110 km, 按4级通航标准建设, 工程内容是在原船闸下游新建一座500吨级船闸, 考虑钱塘江航运远期发展要求, 船闸设计兼顾1000吨级船舶的过闸要求。原有船闸作为上游引航渠道, 新建船闸尺度为300 m×23 m×4.5 m(闸室

长×宽×门槛水深), 船闸设计年货运通过能力将达到2500万t。工程主要由船闸、上下游引航道、节制分水闸、主河道切滩疏浚及配套工程等组成。

1) 工程地质。

围堰填筑区主要土层的工程地质从上到下依次为: ①圆砾(Q_4^{al+pl})、②卵石(Q_4^{al+pl})、③漂石、含漂石卵石(Q_4^{al+pl})、④强风化凝灰岩(J_3^h)。

收稿日期: 2016-05-25

作者简介: 孙万通(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计研究工作。

2) 气候。

钱塘江流域属副热带季风气候区,温和多雨,四季分明,多年平均降水量为 1 598.9 mm,雨量多集中在 3—9 月,占全年降水量的 76.5%。

3) 水文。

施工期洪水状况见表 1。

表 1 富春江坝址下游水位流量

水位/m	流量/(m ³ /s)	水位/m	流量/(m ³ /s)
6	565	15	14 700
7	1 100	16	17 400
8	1 800	17	20 500
9	2 750	18	23 900
10	4 020	19	27 600
11	5 700	20	31 400
12	7 770	21	35 400
13	10 000	22	39 500
14	12 300		

2 围堰

2.1 导流建筑物标准

富春江水电站属 2 级水工建筑物,拟建的船闸主体建筑物为 2 级,下游导航墙等为 3 级建筑物,施工围堰的使用年限 1.5 a,一期导流建筑物

的主体围堰级别为 4 级,子围堰为 5 级,采用土石围堰结构。根据防洪影响评价要求,围堰高度要求不超过 12.5 m,围堰挡水标准采用非汛期(10 月至次年 4 月)10a 一遇洪水标准,流量为 7 110 m³/s,水位 11.88 m。

2.2 布置及结构方案

根据施工期对防洪影响分析及导流方案,在下游节制闸具备过水条件前,围堰在第 2 年汛期要求能过水参与联合泄洪,且要保证汛后能快速恢复。围堰结构形式使用土石过水围堰+子堰方案,实施时对富春江大坝泄洪闸运行进行控制:遇到小洪水时,建议不开右侧 3~4 孔泄洪闸,使泄洪区离纵向围堰尽量远些,减弱对围堰冲刷力;遇到设计洪水必须闸门全开泄洪的情况,最右侧 4 孔闸门安排在最后打开,开闸顺序应由左向右依次进行。

工程一期围堰为过流围堰,围堰上游采用新建浮式检修门作挡水围堰,主体围堰采用土石方结构,包括顶冲段围堰、纵向围堰、唐家洲和下游横向围堰 4 个部分,总长 1 223 m;工程二期围堰由船闸左边墙、下闸首检修门及下闸首右侧横向围堰组成(图 1)。

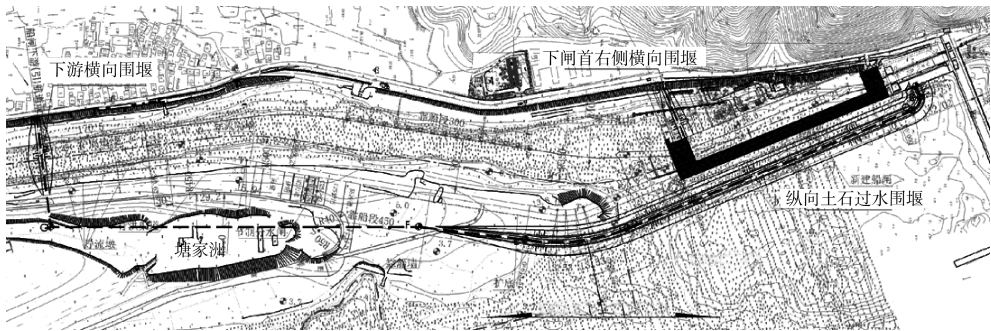


图 1 围堰平面布置

3 围堰结构方案设计

3.1 设计标准

下游围堰采用土石围堰结构,主体围堰为过流围堰。二期围堰为非过流围堰,围堰级别为 4 级,设计标准为 10 a 一遇洪水标准。上游采用新建浮式检修门及新建下沉门兼做上游挡水围堰,挡水标准为 100 a 一遇洪水,流量为 25 800 m³/s,水位 25.36 m。

综合考虑各方面条件,在满足防洪发电需求的情况下,尽量提高施工围堰设计标准,对后期工程实施将更为有利。

3.2 方案设计

在调研国内外导流围堰结构形式的基础上,从结构安全、经济合理、拆除便利、维护简单、施工快速、就地取材等方面综合考虑,提出可行的导流围堰结构形式,从施工风险、经济性、

2) 下游横向围堰。

下游横向围堰布置于导流墩下游右侧, 位于坝下 1.5 km 处, 围堰需要使用 2 个枯水期, 且汛期要满足过流条件, 故围堰采用过水围堰+子围堰加高挡水结构形式, 围堰顶高程按照挡 10 月至次年

年 4 月 $P=10\%$ 洪水标准, 设计洪水流量为 $Q=7\ 110\ \text{m}^3/\text{s}$, 相应水位约为 11.0 m, 确定围堰的顶高程为 11.5 m, 堰体采用砂砾石料填筑, 基础及堰体采用高喷防渗墙防渗 (图 3)。

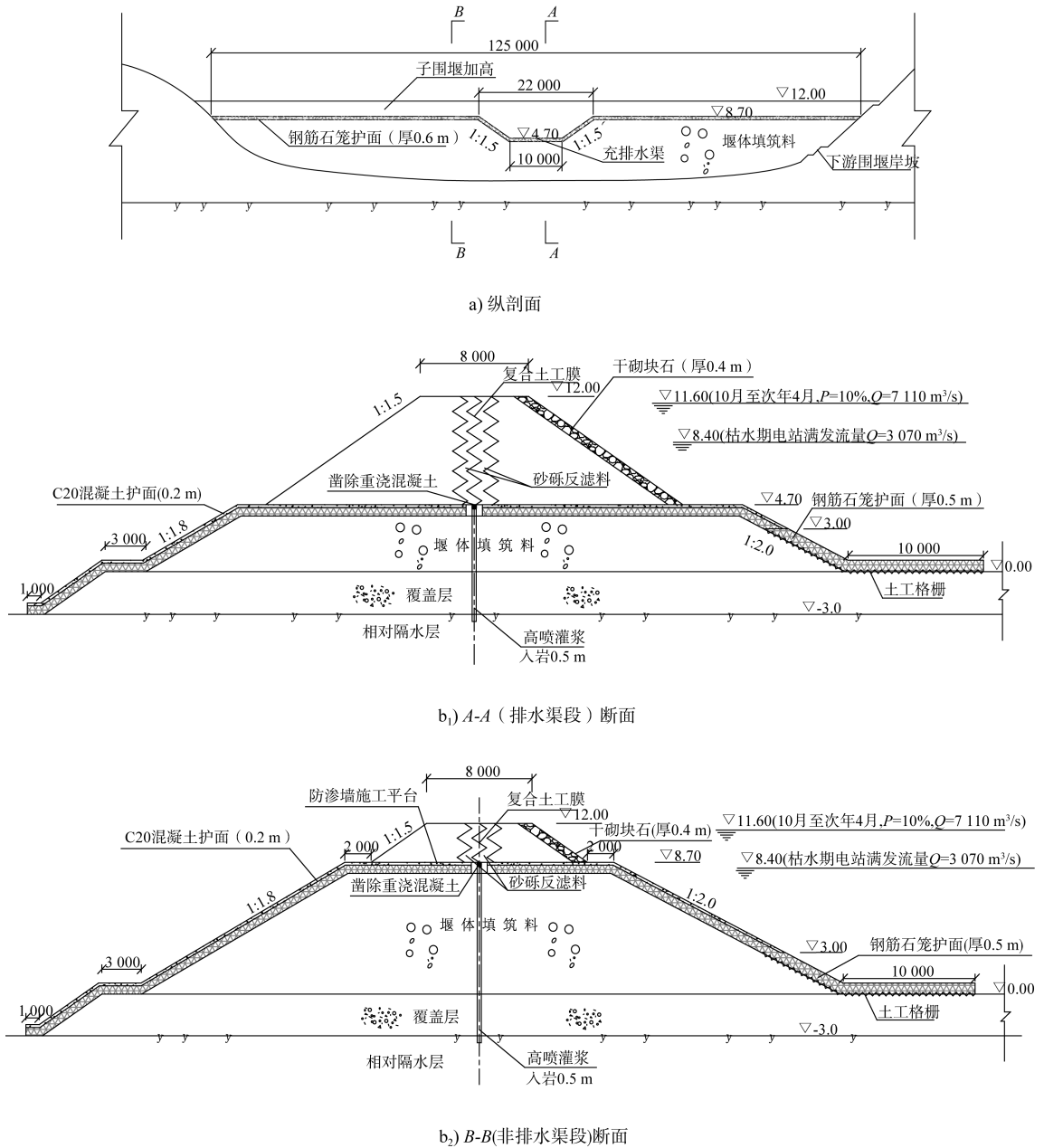


图 3 下游横向过水围堰结构

3) 唐家洲覆盖层范围内的基坑防渗。

纵向围堰与下游模向围堰之间, 由唐家洲连接闭合, 由于唐家洲多为砂砾石覆盖层堆积而成, 覆盖层透水性强, 需要做基础防渗处理, 使基坑的防渗体闭合防渗, 唐家洲范围内的基础均采用

高喷防渗墙处理。

4) 二期下闸首右侧横向围堰。

二期下闸首右侧横向围堰采用土石混合料填筑, 堰体迎水面坡比为 1:2.0, 背水面坡比为 1:1.8, 迎水坡面理砌 40 cm 厚块石护面, 堰体采用土工

膜心墙防渗,围堰基础及右岸坡基础覆盖层深厚,采用高喷防渗处理,围堰挡水高程按全年 $P=10\%$ 洪水设计,确定堰顶高程为 16.0 m。

5) 二期船闸临时挡水断面。

由于二期施工基坑由船闸左边墙下闸首检修门和下闸首右侧横向全年围堰挡水,部分基岩面埋藏较深,闸室边墙基础难以完全坐落到基岩面,因此对于基底坐落在覆盖层的部位,采用高喷灌浆作防渗处理。另外,下闸首检修闸门设计顶高程为 11.0 m,不能满足汛期挡水要求,考虑增加叠梁门加高到 15.5 m,满足度汛挡水要求。

3.3 坝下消能区围堰结构

受枢纽及现有船闸布置限制,若要形成较好的封闭围堰,一般可利用老船闸结构作为挡水围

堰的一部分,同时新建围堰与其紧密衔接,在此布置上新建围堰不可避免地要有局部坐落在大坝溢洪道下游的消能区内,围堰结构受大坝泄洪的影响较大,除需满足一般稳定性要求外,尚需满足抗冲要求,且便于拆除。

富春江船闸扩建改造工程过水围堰布置从老船闸的闸室左边墙开始,至下游江心洲河滩止,平行于扩建船闸的左边墙轴线布置,纵向长度达 850 m,其中位于坝下约 50 m 范围的围堰头部位于坝下消能区内。在大坝溢洪道泄洪时,坝下靠近消能区范围流速大,水流流速最高达 12 m/s,流态复杂,伴随较高的水势,水流具有一定的冲刷效应,围堰面临强大的冲刷和淘蚀作用(图 4)。

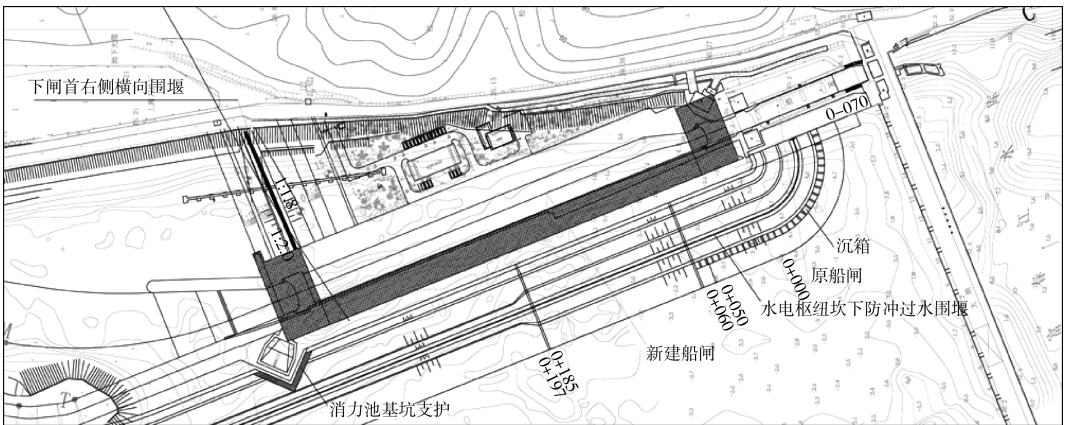
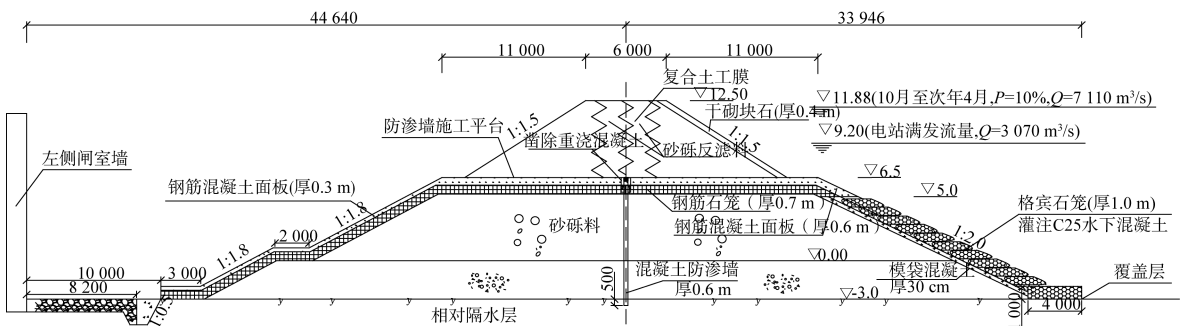


图 4 富春江水电枢纽坝下防冲过水围堰平面布置

现有过水土石围堰结构如图 5a) 所示,只适用于新建水电枢纽施工导流围堰情况,对于已建水电枢纽坝下消能区范围不能起到安全防护作用,在遇汛期泄洪时即会被冲毁。而现有过水现浇混凝土围堰结构如图 5b) 所示,断面很大,顶高程

9.0 m、底宽达 25 m,才能满足水流冲击稳定需要。该现浇混凝土围堰施工需要在外侧先行修建一道挡水的土石围堰,同时,如此大的现浇混凝土断面在围堰完成任务后拆除时难度较大,爆破将对大坝及电站安全产生影响。



a) 土石过水围堰

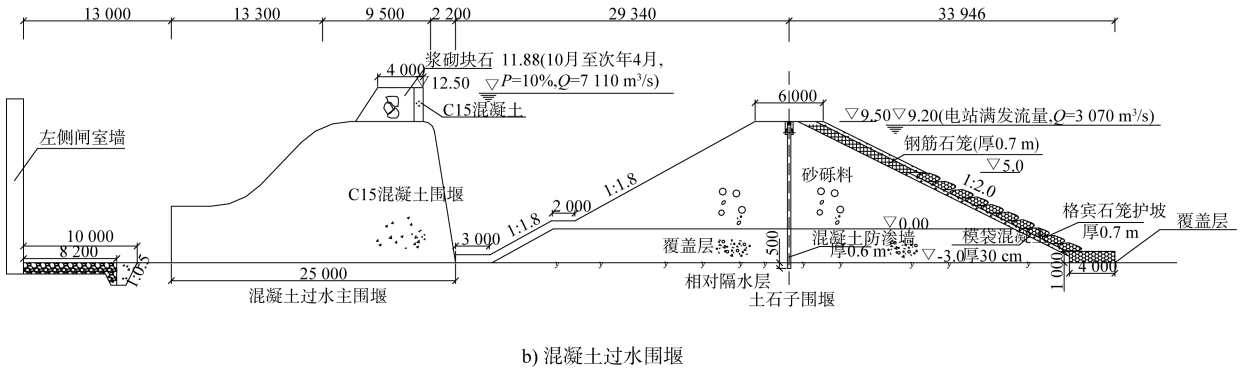


图 5 现有技术中水电枢纽施工过水围堰结构断面

针对现有技术所存在的问题, 采取了一种已建水电枢纽坝下防冲过水的围堰结构, 保障坝下水工建筑物施工安全。围堰分上、下两层: 上层为土石挡水围堰, 在汛期大洪水时临时拆除过水; 下层即为混合结构的过水围堰, 高度达 10 m, 具体为围堰上游侧布置相互连接的钢筋混凝土预制沉箱作为挡水建筑物, 在沉箱前方抛填 50~150 kg 大块石, 并在迎水面安放台阶式大体积(4 m×5 m×2 m)格宾石笼, 坡度为 1:2, 具有较好的消浪消能作用; 在沉箱后方为砂卵石填筑的围堰堰体, 过流堰体顶部布置钢筋石笼及现浇钢筋混凝土面板, 顶高程为 6.5 m, 上游侧与沉箱顶连接, 覆盖整个下游坡面, 坡底至基岩, 满足 10 a 一遇洪水时泄洪安全过水要求。

围堰在枢纽坝下游靠近消能区内设置以相互串联的预制钢筋混凝土沉箱为骨架的临时挡水抗冲建筑物, 沉箱与沉箱之间通过预留槽口, 无需搭立水下模板, 在槽口内填筑水下混凝土以无缝固接相临沉箱。沉箱底部与基岩接触面采用水下膜袋混凝土找平, 以保持沉箱位置安放准确(图 6)。

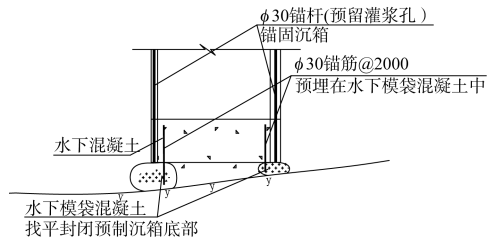


图 6 预制沉箱箱壁锚固孔及锚筋布置

围堰结构是钢筋混凝土预制沉箱结构和土石相结合的混合围堰(图 7)。

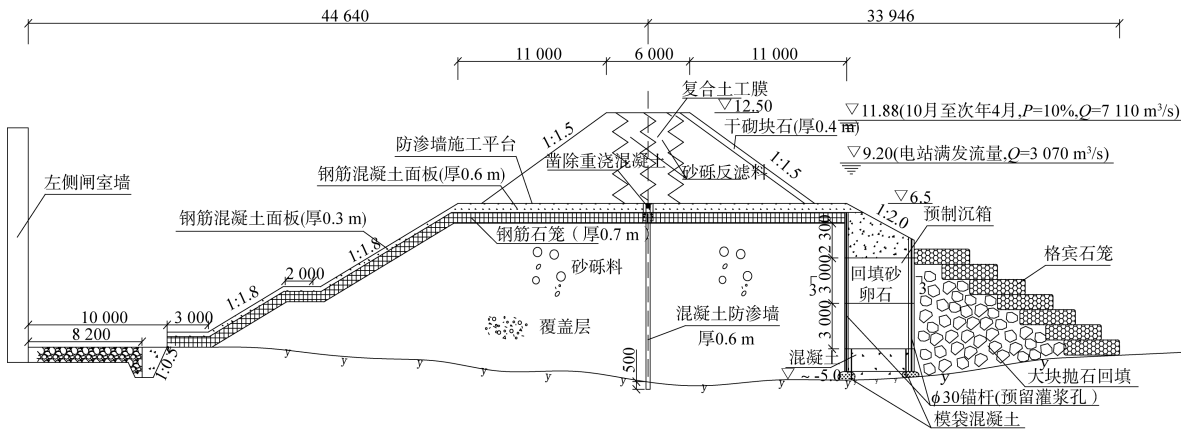


图 7 富春江船闸采用的已建水电枢纽坝下防冲过水围堰结构断面

与现有技术比较, 富春江船闸扩建改造工程坝下消能区内抗冲围堰结构具有以下特点:

- 1) 可以抵抗汛期大坝溢洪道泄洪对围堰结构的冲刷破坏, 进而避免工程损失;
- 2) 通过采用相

互串联的预制沉箱结构, 沉箱底部与基岩接触面采用水下膜袋混凝土找平, 以保持沉箱位置安放准确, 沉箱与沉箱之间通过预留槽口, 槽口内浇筑连接混凝土无需搭立水下模板, 施工速度快, 整

体性好；3) 围堰后方堰体为土石结构，沉箱内部亦填筑为土石，为此，施工完成后，过水围堰易于拆除，不会因爆破拆除而对水电枢纽造成损坏。

4 结语

1) 针对枢纽船闸改扩建工程，除船闸主体建筑物存在“碍航”问题外，其下游引航道建筑物一般也不满足通航条件要求，特别是很多船闸与泄洪闸之间的隔流建筑物设置长度不足，围堰设计将船闸结构全体围入布置，对于天然行洪通道状况不良的情况，结合行洪要求对围堰方案进行分区布置实施。

2) 在发电、行洪、地质、地形等限制条件下，对中高水头坝下围堰设计标准的选择至关重要，综合考虑各方面条件，建议在满足防洪发电要求的情况下，尽量提高施工围堰设计标准，对后期工程实施更为有利。

3) 采用过流保护的土石过水围堰+土石子围

(上接第 135 页)

表 11 数值模拟撞击力平均值与规范公式撞击力对比

模拟船型/t	最大撞击角度/(°)	软件模拟平均撞击力值/kN			规范公式得到的撞击力/kN
		0.3 m/s	0.5 m/s	0.8 m/s	
300	20.25	560.6	1 612.1	1 925.0	40.33
500	14.13	453.2	1 432.1	1 776.7	56.70
1 000	10.88	446.9	1 320.3	1 669.1	90.00

5 结论

1) 通过 ABAQUS/Explicit 数值模拟得到的船舶平均撞击力数值明显大于 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》中公式的计算结果，该公式没有考虑到船舶速度和船舶撞击角度对撞击力的影响，计算出来的撞击力偏小，因此规范公式应用于实际工程会低估撞击力的影响。

2) 通过软件数值模拟不同工况下的船舶撞击闸室墙，分析计算结果可知：当其他条件相同时，过闸船舶撞击闸室的平均撞击力近似与船舶排水量的 0.5 次方近似成线性关系；与撞击速度的 1 次方成近似线性关系；与撞击角度的 1 次方近似成线性关系。

堰加高挡水的结构形式，针对坝下新填筑以砂砾料为主的水中土石围堰，在综合比选各种防渗结构优缺点的基础上，提出采用地连墙与旋喷防渗墙相结合的防渗结构。

4) 受枢纽及现有船闸布置限制，新建围堰不可避免地要有局部坐落在大坝溢洪道下游的消能区内，围堰结构受大坝泄洪的影响较大。因此，不但要满足一般稳定性要求，还需满足抗冲、便于拆除的要求。

参考文献：

[1] 金国强,李浙江,张公略,等.富春江船闸扩建改造工程施工图设计说明书[R].杭州:浙江省交通规划设计研究院,2012.
 [2] 楼伟中.富春江船闸扩建改造工程围堰顶冲段沉箱设计验算与优化[J].中国水运,2013(9):51-53.
 [3] 黄靖,杨娟,沈小勤,等.富春江船闸扩建改造工程防洪影响评价报告[R].杭州:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2009. (本文编辑 郭雪珍)

参考文献：

[1] 余友安,廖乐康.通航设施防撞梁的塑性吸能原理与应用[J].人民长江,1998(S1):46-48.
 [2] 高兴和,常语锋,顾燕飞.通航建筑物防护加固设计的探讨——粘钢、植筋技术在蠡河水利枢纽防护加固中的应用[C]//中国交通土建工程学术论文集 2006.成都:西南交通大学出版社,2006.
 [3] 沈金根,陆建新.对超标准船舶过闸的思考[J].民营科技,2008(11):138-139.
 [4] 汪国勤.船闸闸首闸室墙面损坏修理技术[J].水运工程,1993(1):34-36.
 [5] 郑昌利.硅粉水泥砂浆与船闸闸墙修复的研究[J].水运科技信息,1994(21):7-9.
 [6] 陈达,谢春秋,廖迎娣,等.闸墙碰撞分析及其混凝土性能指标研究[J].水运工程,2013(5):120-123.
 [7] 卜丁,杨斌.船闸闸室结构三维有限元仿真分析[J].水运工程,2010(9):105-109.
 [8] 黄本才.组合结构振动的等效阻尼[J].上海力学,1998,19(2):141-144.
 [9] 刘建成,顾永宁.船-桥碰撞力学问题研究现状及非线性有限元仿真[J].船舶工程,2002(5):4-9. (本文编辑 武亚庆)