

文章编号:1007-2284(2021)09-0167-07

# 邕宁水利枢纽一期枯水围堰替代结构及其关键问题

刘德兵<sup>1</sup>,赵彦准<sup>2</sup>,常运超<sup>1</sup>,贺昌海<sup>2</sup>

(1. 中铁二十局集团第六工程有限公司,西安 710016; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

**摘要:**为了解决围堰施工进度和料场征地移民进度之间的矛盾,在邕宁水利枢纽工程施工阶段提出了一期枯水围堰设计方案的替代结构型式,并利用施工仿真、技术经济分析方法对围堰型式进行了优选;采用三维数值模拟和物理模型试验方法研究了束窄河床水力特性,结果表明,当纵堰轴线布置在坝体7号至8号闸墩之间时,能够解决施工期通航和围堰防冲问题。研究结果为本工程一期枯水围堰施工提供了重要依据,对于保证工程施工进度起到了决定性作用。

**关键词:**围堰;征地移民;施工期通航;防冲;三维数值模拟;物理模型试验

**中图分类号:**TV551.3 **文献标识码:**A

刘德兵,赵彦准,常运超,等.邕宁水利枢纽一期枯水围堰替代结构及其关键问题[J].中国农村水利水电,2021(9):167-173,178.

LIU D B, ZHAO Y Z, CHANG Y C, et al. The alternative solution and key problems of the 1st stage cofferdam of Yongning Water Control Project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9):167-173, 178.

## The Alternative Solution and Key Problems of the 1st Stage Cofferdam of Yongning Water Control Project

LIU De-bing<sup>1</sup>, ZHAO Yan-zhun<sup>2</sup>, CHANG Yun-chao<sup>1</sup>, HE Chang-hai<sup>2</sup>

(1. China Railway 20 Bureau Group Corporation, Xi'an 710076, Shaanxi Province, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**Abstract:** To solve the contradiction between the cofferdam construction progress and the material land requisition and resettlement, the alternative solutions of the designed scheme is proposed during the construction of Yongning water control project 1st stage cofferdam of the dry season, optimized by construction simulation, technical and economic analysis methods. The hydraulic characteristics of the narrowed riverbed are investigated by 3D-numerical simulation and physical model test methods. The results show that when the axis is arranged between 7# and 8# gate pier of the dam body, the problem of navigation and scour prevention for the cofferdam can be resolved. The results provide an important basis for the construction of the 1st stage cofferdam of the dry season, thus decisively ensuring the construction progress of this project.

**Key words:** cofferdam; land requisition and resettlement; navigation during construction; scour prevention; 3D-numerical simulation; physical model test

收稿日期:2021-03-17

作者简介:刘德兵(1979-),男,高级工程师,主要从事土木、水利工程施工组织与管理方面研究。E-mail: gongchengbu6@126.com。

通讯作者:贺昌海(1966-),男,教授,主要从事水利工程施工组织管理与系统仿真方面的研究。E-mail: hch\_2003@163.com。

水利水电工程分期导流设计和施工中,一期导流采用土石围堰的工程实例较多,且多数涉及施工期通航问题。三峡工程一期土石围堰型式采用风化砂堰壳、混凝土防渗墙上接土工膜防渗方案;向家坝水电站一期土石围堰由砂卵石、堆石、过渡料填筑而成,堰基及堰体分别采用塑性混凝土防渗墙及复合土工膜斜心墙型式作防渗处理<sup>[1]</sup>;枕头坝一级水电站一期纵向围

堰采用土石结构堰体、混凝土防渗墙防渗,进口段直接利用预留岩坎挡水<sup>[2]</sup>。前人利用水工模型试验和数值模拟方法对工程水力学问题的研究取得了不少成果<sup>[3-7]</sup>,对分期导流的研究成果也较丰富。戴会超等<sup>[8]</sup>运用水工模型试验和数值模拟技术,改进了三峡工程明渠体形,解决了特殊情况下明渠通航条件问题;梁日新等<sup>[9]</sup>结合水工模型试验成果对枕头坝一级水电站导流明渠纵向土石子围堰的防冲调整方案进行了研究,使防冲体经受住了实际大洪水的考验;彭杨等<sup>[10]</sup>用二维数值模拟方法研究了分期导流不同河床束窄度下围堰附近的水流运动特性;贺昌海等<sup>[11]</sup>基于CATIA三维建模和三维数值模拟方法,对苏丹上阿特巴拉水利枢纽儒米拉大坝分期导流溢洪道内部水流进行了模拟,模拟结果与试验值吻合较好。

总之,“土石料填筑堰体、混凝土防渗墙防渗”的围堰结构型式在分期导流一期工程中普遍采用,施工方法成熟,施工速度快,防渗效果理想,应用水工模型试验和数值模拟方法研究分期导流的成果较多,解决了大量工程实际问题。然而,在施工阶段因工程料源受限而使土石围堰设计方案不能实施的案例极少。邕宁水利枢纽一期枯水土石围堰料场征地移民进度滞后,导致围堰设计方案不能实施。因此,如何因地制宜地调整围堰结构和布置,成为工程能否顺利进行的关键问题。

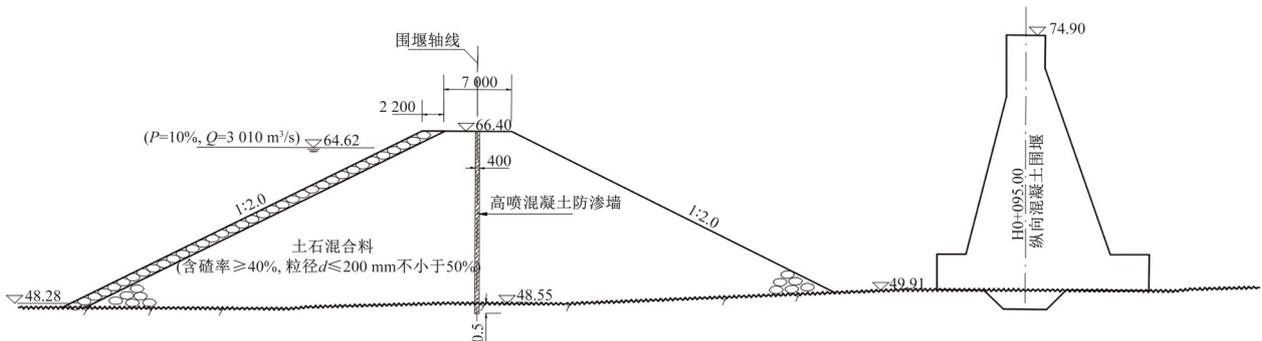


图1 一期枯水土石围堰设计断面图(图中高程单位为m,其余单位为mm)

Fig.1 The designed cross-section of the 1st stage cofferdam of dry season

航运部门要求施工期按Ⅲ级航道标准开通,一期导流施工时1000 t船队通航允许水流条件:正向流速 $\leq 3.0$  m/s,回流流速 $\leq 0.4$  m/s,横向流速 $\leq 0.3$  m/s;最小航道尺寸为航宽60 m $\times$ 水深3 m $\times$ 弯曲半径180 m(双线)。超过这个范围则应采取辅助航行或禁止通航。

## 2 围堰替代结构

由于设计选用的马登山土料场第1区至第3区因征地原因无法利用,坝址区附近没有满足要求的备用料场,因此,按照控制性进度计划要求,在围堰填筑前(9月25日前)完成80万m<sup>3</sup>以上、满足设计要求的土石混合料储备极为困难,实际施工时不可能采用设计围堰结构,工程面临工期拖延一年的严重后果。

为解决这一难题,根据坝址可用填筑料的初步分析,提出了围堰替代结构型式。

(1)单块石戛堤及含砾黏土体组合围堰。以围堰设计方案轴线为基准进行平面布置,包括上下游横堰、纵堰和裹头,全长

## 1 工程概况

南宁市邕宁水利枢纽工程位于青秀区仙葫开发区牛湾半岛处,坝区为邕江冲洪积阶地过渡为剥蚀残丘地貌,河流由西流入,转向南经坝区往下游拐弯再转向北东向,环绕牛湾半岛弯曲呈不规则的反“S”形状。枢纽位于西津水电站库区内,枯水期河床水深达12~15 m,水面宽230~280 m,两岸边坡坡度20°~70°。主要水工建筑物有拦河坝、13孔闸坝、发电厂房、船闸和鱼道,正常蓄水位67 m,总库容7.1亿m<sup>3</sup>,电站装机容量57.6 MW(6 $\times$ 9.6 MW),为灯泡贯流式机组,多年平均发电量2.206亿kWh。

工程设计采用分期导流方式,右岸一期枯水围堰挡水时段11月15日至次年4月15日,设计流量3010 m<sup>3</sup>/s(枯水期10年一遇),主要任务是修建一期全年混凝土纵向围堰和上下游横向土石围堰,计划于一枯11月底完成填筑,至一汛前(次年4月16日至次年5月15日)拆除。一期枯水围堰由上下游横堰、纵堰和裹头组成,全长981.9 m,填筑土石混合料74.86万m<sup>3</sup>,要求其中石渣含量大于等于40%,粒径 $d \leq 200$  mm的含量不小于50%,防渗采用高压旋喷混凝土防渗墙,其轴线处的土石混合料剔除粒径200 mm以上大块石(图1)。围堰土石混合料计划取自马登山土料场,其填料石渣含量40%~70%,物理性质指标满足要求。

981.90 m。外侧(即靠束窄河床一侧)戛堤采用粒径 $D \geq 500$  mm占80%、500 mm $>D \geq 200$  mm占20%的块石料填筑。内侧(即靠一期基坑一侧)采用含砾黏土填筑,内侧坡脚侵占一期纵向混凝土围堰结构区域约8 m。子堰采用黏土填筑,子堰外侧边坡及含砾黏土堰面采用块石护面(图2)。

(2)双块石戛堤及含砾黏土体组合围堰。围堰轴线位置、围堰组成和长度同上。围堰外侧和内侧戛堤对称布置,均采用以上同样的块石料填筑。块石戛堤之间填筑含砾黏土。子堰结构同上(图3)。

对上述围堰结构方案进行工程量计算和造价估算,同时,采用循环网络技术建立围堰施工运输系统仿真模型,并编制计算程序对围堰施工工期进行仿真计算<sup>[12]</sup>,计算结果见表1。

从表1可以看出,两种围堰的施工工期接近,围堰填筑从9月底开始,11月底完成。根据工程施工经验,高喷混凝土防渗墙(2.32万m<sup>3</sup>)施工约45 d,基坑排水约15 d,一期全年上下游土石围堰土石方填筑(约60万m<sup>3</sup>)和混凝土纵向围堰(7.32万m<sup>3</sup>)

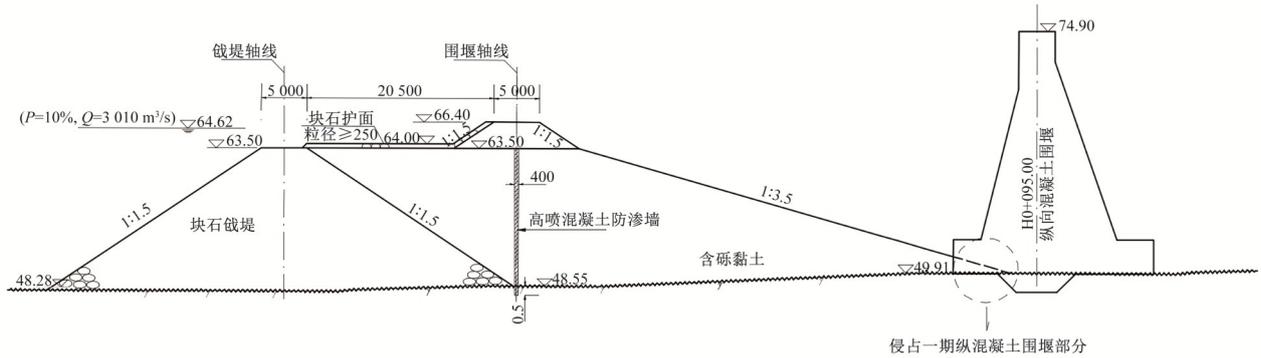


图2 单块石戗堤及含砾黏土体组合围堰断面图(图中高程单位为m,其余单位为mm)

Fig.2 The cross-section of the cofferdam with single block stone dike and grain-containing clay body

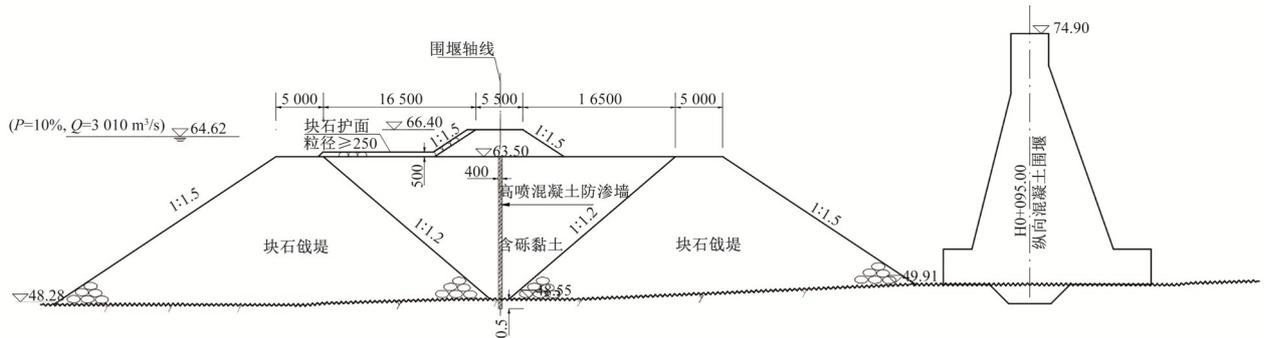


图3 双块石戗堤及含砾黏土体组合围堰典型断面图(图中高程单位为m,其余单位为mm)

Fig.3 The cross-section of the cofferdam with double block stone dike and grain-containing clay body

表1 围堰替代方案工程量及工期

Tab.1 Project quantity and duration of the cofferdam alternative solution

围堰结构型式	含砾黏土/万m <sup>3</sup>	块石料/万m <sup>3</sup>	高压喷射钻机钻灌浆孔/万m	高压旋喷灌浆/万m	钢筋石笼护脚/万m <sup>3</sup>	块石护面/万m <sup>3</sup>	陆上拆除/万m <sup>3</sup>	水下拆除/万m <sup>3</sup>	工期/d	造价/万元
单块石戗堤及含砾黏土围堰	89.14	48.03	2.37	2.32	2.38	1.21	9.17	128.00	56	15 130.30
双块石戗堤及含砾黏土围堰	34.72	96.83	2.37	2.32	2.38	0.90	8.79	122.76	51	17 387.99

注:表中单块石戗堤及含砾黏土体组合围堰造价计入了坡脚侵占部分的开挖和加固估算成本。

约75 d,两种围堰均满足后续工程的施工进度计划要求,即能够在次年4月15日前完成一期全年围堰施工。从工程前期施工资料分析,马登山石料场、河床右岸护岸等工程开挖可获得石料约57万m<sup>3</sup>,含砾黏土189万m<sup>3</sup>,满足方案(1)的块石料和土料供给需求,而方案(2)则另需外购、储备块石料约40万m<sup>3</sup>,短期内难以完成,而且围堰造价比前者高出14.92%。因此,应采用第一种结构型式。

### 3 纵堰轴线位置优化

从泄水闸布置、二期导流和施工期通航要求出发,考虑两种纵堰轴线位置方案(表2)。为减少试验工程量,先采用数值模拟方法研究设计挡水流量(3 010 m<sup>3</sup>/s)下束窄河床的水力特性。

#### 3.1 计算模型与计算条件

利用CATIA建立1:1的河床和围堰三维模型(图4至图5)。

水流控制方程包括连续性方程和动量方程,为了模拟弯曲

表2 纵堰轴线位置方案

Tab.2 Schemes of the longitudinal cofferdam axis position

方案	轴线位置	备注
1	7号、8号闸墩之间	与原设计纵堰轴线位置相同
2	8号、9号闸墩之间	原设计纵堰轴线向外侧移动

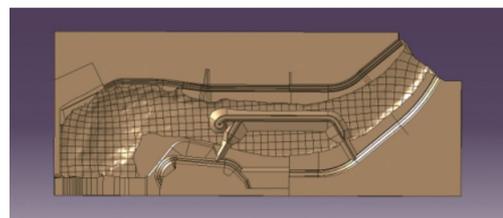


图4 方案1三维模型

Fig.4 3D model of scheme 1

水流,采用RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型<sup>[11]</sup>。

模拟范围从0-1 250 m至0+575 m,全长1 825 m,由A、B、C三个网格块包围(图6)。采用立方体结构化网格,网格纵横比为1,单元边长2 m,总数量约 $2 \times 10^7$ 个。

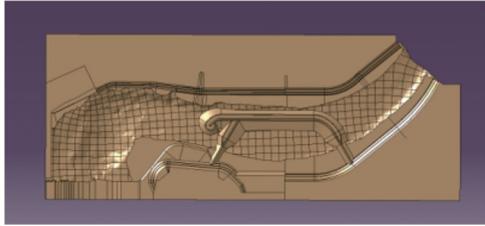


图5 方案2三维模型

Fig.5 3D model of scheme 2

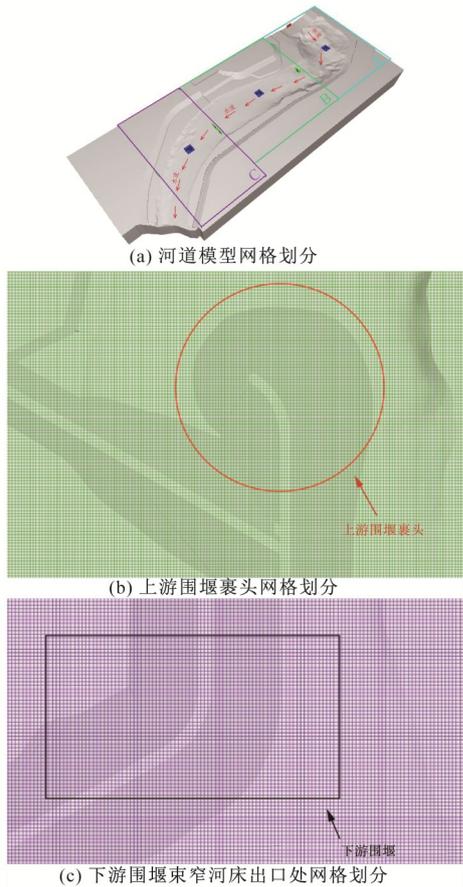


图6 计算区域网格划分

Fig.6 Mesh generation of the computational domain

网格块A(0-1 250 m至0-670 m)为上游河道转弯及束窄河床入口区域,其中 $X_{min}$ 设置为流量边界,通过流量和上游水面高程确定流速。网格块B(0-670至0+100)为围堰主体及河道顺直区域。网格块C(0+100 m至0+575 m)为束窄河床出口及下游河道转弯区域,其中 $Y_{min}$ 设置为压力边界,确定下游自由水面高程。A、B、C三个网格块的 $Z_{min}$ 均设为无滑移界面边界, $Z_{max}$ 设为压强为0的压力边界;其余边界均保持对称边界的默认设置。

采用FLOW-3D中的交错网格有限差分法离散控制方程,压力速度分离式解法选用极小残差算法(GMRES),流体自由表面位置利用TruVOF法追踪<sup>[11]</sup>。

### 3.2 计算结果与分析

两个方案束窄河床整体流态相似,无回流及明显旋涡现象。

图7、8分别为束窄河床上游入口至下游出口各断面水位和最大表面流速对比图。从图中可以看出,方案1最高水位64.61

m,与最低水位差值0.34 m,最大水面降落出现在束窄河床后段;方案2最高水位65.16 m,与最低水位差值0.53 m,最大水面降落出现在束窄河床前段;由于方案2的河床束窄度较大,方案2水面线高于方案1。两方案均在束窄河床下游出口近左岸处出现最大表面流速,分别为2.89,4.91 m/s,近右岸处流速明显回落;方案2流速波动较为剧烈,且各测点相应流速值高于方案1。

可见,相比较而言,方案2的水力条件较为不利。

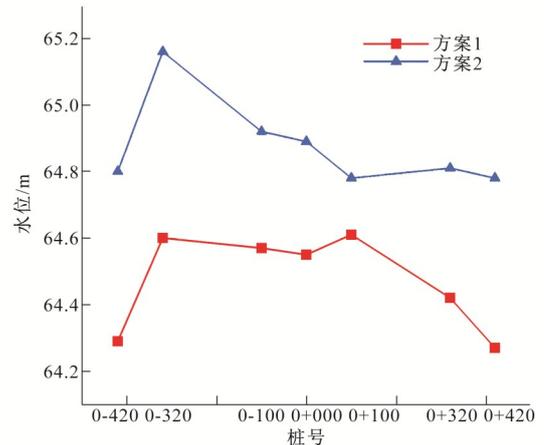


图7 束窄河床水面线对比

Fig.7 Comparison of the water surface profile

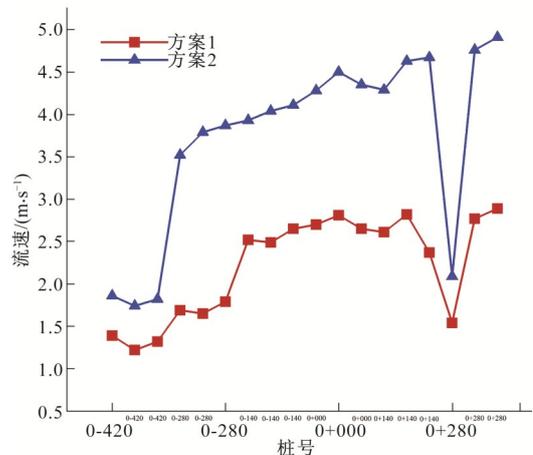


图8 束窄河床最大表面流速对比

Fig.8 Comparison of the maximum surface flow velocity

由表3可看出,虽然两方案的束窄河床水面宽度都大于60 m,平均水深都大于3 m,满足航道尺寸要求,但方案2束窄河床水面宽小于方案1,且其束窄河床的最大正向流速大于3.0 m/s,不满足施工期通航允许流速条件。

表3 通航水力学指标对比

Tab.3 Comparison of the navigational hydraulic index

方案	水深大于3 m的河床水面宽/m	最大正向流速/(m·s <sup>-1</sup> )	平均水深/m	流态
1	126.29	2.89	12.45	无回流和横向流
2	101.80	4.91	13.26	无回流和横向流

根据以上分析,纵堰轴线位置只能采用方案1。对于前文提及的内侧含砾黏土体侵占一期纵向混凝土围堰结构范围的问题,可在基坑抽水后采取开挖及加固等措施解决。

#### 4 施工期通航与围堰防冲

为了解决施工期通航和围堰防冲问题,以下采用数值模拟和物理模型试验方法,详细研究方案1各种特征流量下束窄河床的水力特性,数值模型和网格划分参见3.1,物理模型长度比尺1:70。

##### 4.1 计算和试验工况

计算和试验工况参见表4。

表4 方案1计算和试验工况  
Table 4 Calculation and test cases of scheme 1

工况	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	时段和频率	方案
1	3 010	11月15日-次年 4月15日,10%	方案1(纵堰轴线位于 7号、8号闸墩之间)
2	2 480	11月15日-次年 4月15日,20%	
3	1 730	11月15日-次年 4月15日,50%	

##### 4.2 水力特性计算和试验结果

(1)束窄河床流态。从图9至图12可以看出,不同流量下,计算流态和试验流态接近,束窄河床和围堰裹头段水流流态均较为平顺,无旋涡及回流现象。束窄河床入口处水流平稳,下游出口近左岸处流态稍急,但总体过渡平顺。

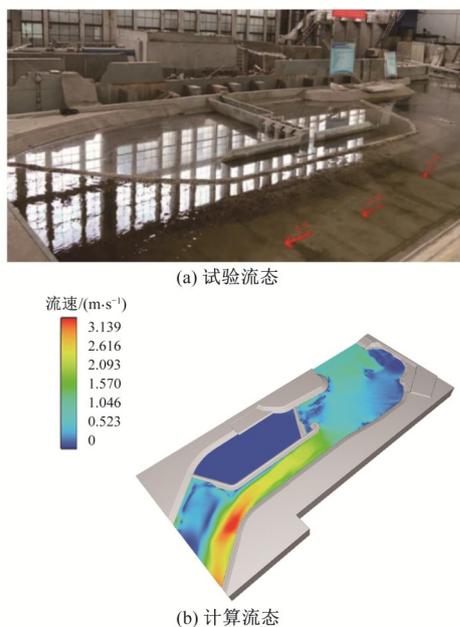


图9 工况1试验流态和计算流态  
Fig.9 The test and calculated flow pattern of case 1

(2)束窄河床流速。从图13和表5可看出,流速计算值和试验值整体上吻合较好,其中,工况1:最大表面流速值计算值2.89 m/s和试验值2.85 m/s均出现在下游断面0+280,前者靠近

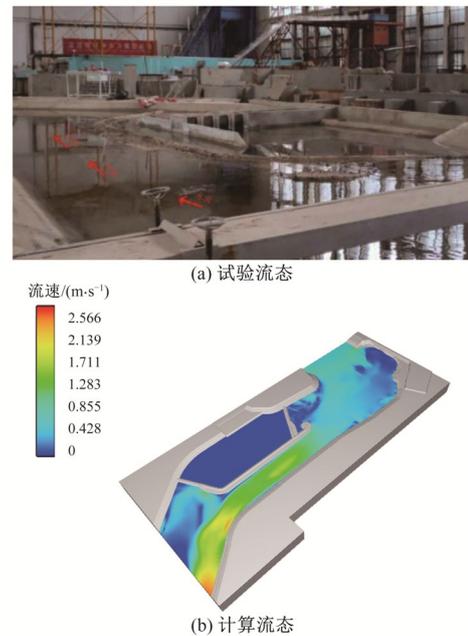


图10 工况2试验流态和计算流态  
Fig.10 The test and calculated flow pattern of case 2

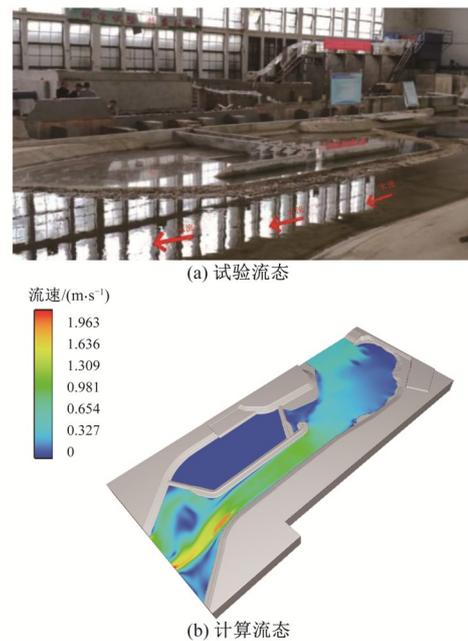


图11 工况3试验流态和计算流态  
Fig.11 The test and calculated flow pattern of case 3



图12 工况1围堰裹头段试验流态  
Fig.12 The test flow pattern of the head section of the cofferdam of case 1

断面左岸,后者在断面中部;工况2:最大表面流速计算值2.55 m/s与试验值2.76 m/s均出现在下游断面0+140,前者靠近断面左岸,后者在断面中部;工况3:最大表面流速计算值1.94 m/s与试验值2.09 m/s均出现在下游断面0+280,均位于断面中部。

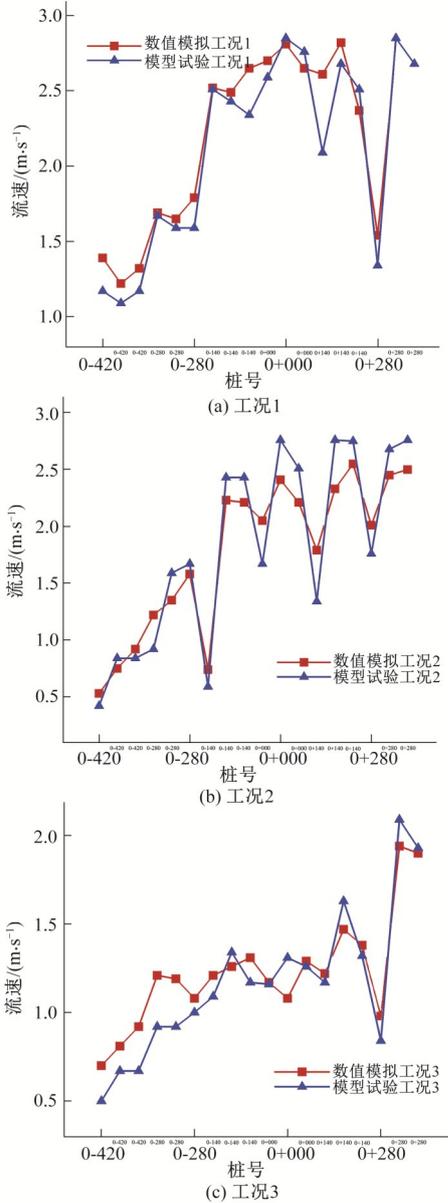


图13 最大表面流速试验值和计算值

Fig.13 The test and calculated maximum value of surface velocity

表5 围堰外侧边坡各断面流速分布(工况1) m/s

Tab.5 The velocity distribution of each section of the outside slope of the cofferdam (case 1)

断面(桩号)	0-420	0-280	0-140	0+000	0+140	0+280
表面流速	试验值	0.50	1.35	0.44	0.35	0.59
	计算值	0.61	1.37	0.88	0.76	0.61
坡底流速	试验值	0.97	1.78	1.70	1.66	1.49
	计算值	0.73	2.20	1.96	1.31	1.42

(3)束窄河床水面线。图14表明,试验水面线略高于计算水面线,最大绝对误差0.25 m(工况1),水面线整体吻合良好。

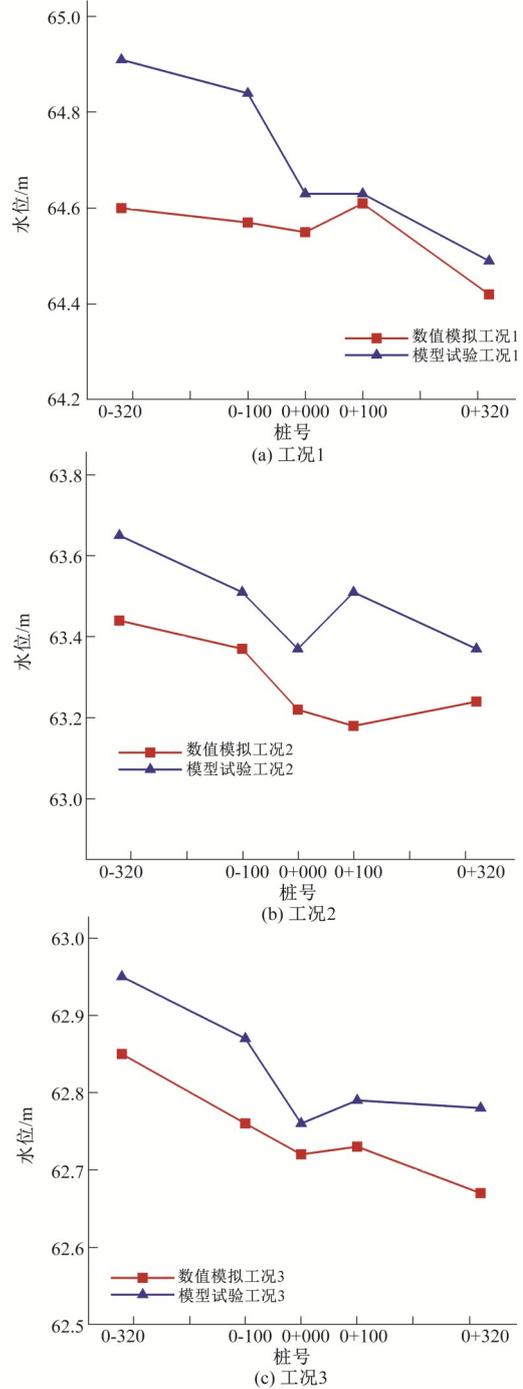


图14 试验水面线和计算水面线

Fig.14 The test and calculated water surface profile

### 4.3 施工期通航

流量3 010、2 480、1 730 m<sup>3</sup>/s的通航水力学指标见表6。束窄河床最大正向流速均小于3.0 m/s,水深大于3 m对应的束窄河床水面宽均远大于最小航宽60 m,且均无回流及旋涡现象。所以,当纵堰轴线布置在7号、8号闸墩之间时,束窄河床满足施工期通航条件。

### 4.4 围堰防冲

为了详细分析围堰外侧边坡、上游裹头和下游出口在设计流量下是否会被水流冲刷,将图6(a)中的B、C网格块沿X轴-160 m至100 m局部加密,单元格边长取1 m,网格总数量约6×

表6 通航水力学指标

Table 6 The hydraulic index of navigation

工况	水深大于3 m的 河床水面宽/m	最大正向流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	平均水深/ m	流态
1	124.29/121.84	2.89/2.85	12.45/13.19	无回流和 横向流
2	122.45/120.55	2.55/2.76	11.42/12.01	无回流和 横向流
3	120.66/119.09	1.94/2.09	9.51/10.14	无回流和 横向流

注:表中数据前者为计算值,后者为试验值。

10<sup>7</sup>个(图15)。

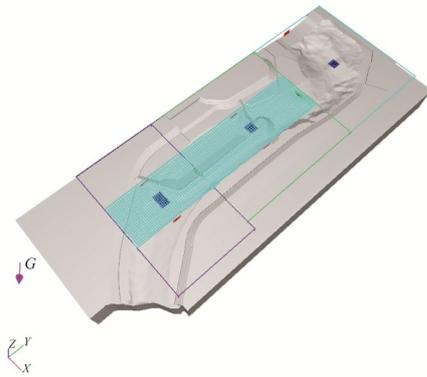
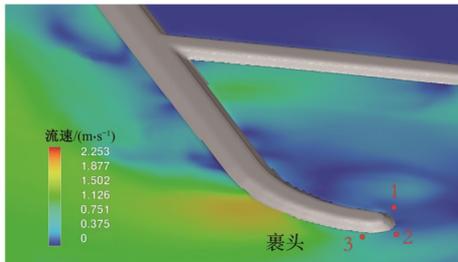


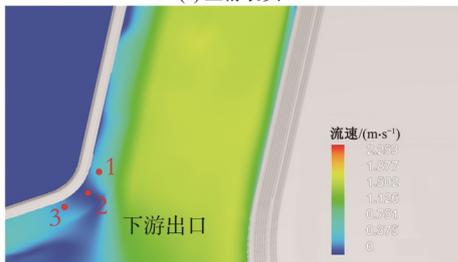
图15 网格加密

Fig.15 Mesh encryption

计算得到围堰裹头、下游出口处表面和坡底流态分布(图16至图17)。



(a) 上游裹头



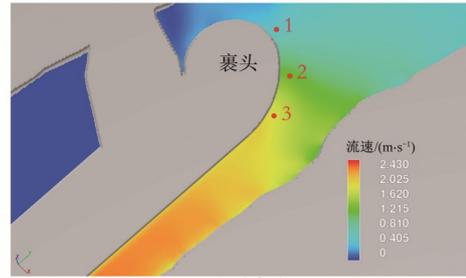
(b) 下游出口

图16 表面流态及流速测点

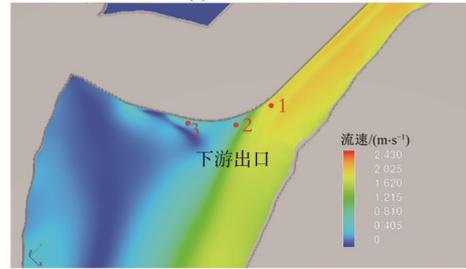
Fig.16 The flow pattern and velocity measurement point on the surface

读取流态云图(图16至图17),可求得裹头和下游出口处表面和坡底各测点流速(表7)。

从表7可以看出,围堰上游裹头和下游出口的表面流速和坡底流速范围为0.31~1.90 m/s。



(a) 上游裹头



(b) 下游出口

图17 坡底流态及流速测点

Fig.17 The flow pattern and velocity measurement point on the slope bottom

表7 裹头与下游出口平均流速

Tab.7 The average flow velocity of the wrap head and downstream outlet

位置	流速测点	流速/(m·s <sup>-1</sup> )
上游裹头	表面	1 0.41
	表面	2 0.78
		3 0.81
		坡底
	坡底	2 1.18
		3 1.90
下游出口		表面
	表面	2 0.29
		3 0.31
		坡底
	2 0.84	
	3 0.42	

表8为设计流量下、网格加密前和加密后围堰外侧边坡各断面的表面和坡底的计算流速,网格加密后的计算流速范围0.45~1.97 m/s,与表5中的试验值相比较,平均误差更小。

表8 计算流速对比

Tab.8 Comparison of the calculated flow velocity

断面(桩号)	0-	0-	0-	0+	0+	0+	
	420	280	140	000	140	280	
表面流速	计算值(加密前)	0.61	1.37	0.88	0.76	0.61	0.37
	计算值(加密后)	0.88	1.68	0.52	0.45	0.64	0.60
坡底流速	计算值(加密前)	0.73	2.20	1.96	1.31	1.42	0.52
	计算值(加密后)	1.18	1.97	1.92	1.73	1.68	0.76

根据式(1)计算可得:粒径200 mm的块石抗冲流速2.24~3.14 m/s,粒径500 mm的块石抗冲流速3.54~4.95 m/s。

$$V = (5-7) \sqrt{D} \quad (1)$$

式中: $D$ 为块石粒径,m。

(下转第178页)

点,这主要是因为小波变换、傅里叶变换和奇异谱法重构分离出的趋势项受连续异常值的影响,因此对于时间不连续、测值少且变化剧烈的时间序列适用性不强。 □

#### 参考文献:

- [1] 苏怀智,王 锋,刘红萍.基于POT模型建立大坝服役性态预警指标[J].水利学报,2012,43(8):974-978.
- [2] 冯 帆,邱信蛟,张国新,等.基于施工期变形监测的特高拱坝力学参数反演研究[J].岩土力学,2017(1):237-246.
- [3] 李明超,任秋兵,沈 扬.贝叶斯框架下的大坝变形交互式时变预测模型及其验证[J].水利学报,2018,49(11):1 328-1 338.
- [4] 吕永宁,王玉洁,沈海尧.水电站大坝安全监测自动化的现状和展望[J].大坝与安全,2007(5):24-29.
- [5] 陶家祥,熊红阳,胡 波.论大坝安全监测数据异常值的判断方法[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(6):15-17,41.
- [6] 周元春,甘孝清,李端有.大坝安全监测数据粗差识别技术研究[J].长江科学院院报,2011,28(2):16-20.
- [7] 花胜强,胡少英,罗孝兵,等.大坝位移监测中的粗差剔除方法[J].水力发电,2017(9):110-112.
- [8] LIU F T, KAI M T, ZHOU Z H. Isolation Forest[P]. Data Mining, 2008. ICDM '08. Eighth IEEE International Conference on, 2008. DOI:10.1109/ICDM.2008.17.
- [9] WU W, CHEN Y L. Application of isolation forest to extract multivariate anomalies from geochemical exploration data[J].Global Geology,

2018, 21(1):36-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9736.2018.01.04.

- [10] 徐 东,王岩俊,孟宇龙,等.基于Isolation Forest改进的数据异常检测方法[J].计算机科学,2018,45(10):155-159.
- [11] 唐 鹏,郭宝平.改进型阈值函数寻优法的小波去噪分析[J].信号处理,2017,33(1):102-110.
- [12] 蔡长青,张永山.改进阈值的窗口傅里叶变换滤波[J].激光与光电子学进展,2015,52(3):165-170.
- [13] 肖小兵,刘宏立,马子骥.基于奇异谱分析的经验模态分解去噪方法[J].计算机工程与科学,2017,39(5):919-924.
- [14] 梁桂兰,徐卫亚,谈小龙,等.岩石高边坡安全监测数据的小波变换去噪处理[J].岩石力学与工程学报,2008(9):1 837-1 844.
- [15] 许景波,袁怡宝,刘 泊,等.时域测量中高通低通滤波器的有理逼近设计方法[J].固体电子学研究与进展,2011,31(6):553-558.
- [16] BROOMHEAD D S, KING G P. Extracting qualitative dynamics from experimental data [J]. Physica D, 1986(20):217-236. DOI: 10.1016/0167-2789(86)90031-X
- [17] 卢德林,郭兴明.基于奇异谱分析的心音信号小波包去噪算法研究[J].振动与冲击,2013,32(18):63-69.
- [18] 侯泳旭,段 磊,秦江龙,等.基于Isolation Forest的并行化异常探测设计[J].计算机工程与科学,2017,39(2):236-244.
- [19] PREISS B R. Data structures and algorithms with object-oriented design patterns in Java[M]. New Jersey:Wiley, 1999.

#### (上接第173页)

由此可见,在设计流量下,围堰外侧边坡、上游裹头和下游出口流速均小于块石的计算抗冲流速,物理模型试验中也没有材料发生启动流失现象,因此,围堰边坡不会被水流冲刷,无需采取其他防护措施。

## 5 结 语

在邕宁水利枢纽工程施工阶段,由于设计选用的马登山土料场征地拆迁进度缓慢,不可能采用设计方案按期完成围堰备料和填筑施工。在分析现场可用填筑料的基础上,研究提出了一期枯水围堰的替代结构。

(1)利用施工仿真、技术经济分析方法对围堰的替代结构型式进行了优选,结果表明,单块石戗堤及含砾黏土体组合围堰可充分利用现场开挖料,且满足后续工程的施工进度计划要求,造价较低。

(2)采用数值模拟和物理模型试验方法,研究了纵堰轴线不同布置的束窄河床水力特性,结果表明,纵堰轴线布置在坝体7号至8号闸墩之间时,能够解决施工期通航和围堰安全问题。

在城市区域内的河流上修建水利工程,征地移民不确定性影响因素多、难度大,在围堰施工前料场征地移民进度不满足要求的制约下,应深入研究利用现场开挖料修筑围堰的可能性。本文的研究成果为邕宁水利枢纽一期枯水围堰施工提供了解决方案,对于保证工程施工进度起到了决定性作用,可为类似工程施工提供参考。 □

#### 参考文献:

- [1] 李建军.向家坝水电站施工导流方案研究[J].人民长江,2015,

46(2):71-75.

- [2] 张毅驰,彭继乐,林国辉.枕头坝一级水电站分期施工导流设计及优化[J].水力发电,2015,41(8):66-69.
- [3] JOHNSON M C, SAVAGE B M. Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(12):1 353-1 357.
- [4] XIE JB, AI YP, ZHANG WX, et al. Hydraulic model test on diversion structures of Gongguoqiao hydropower station during construction [J]. Procedia Engineering, 2012,31(1):44-50.
- [5] CHINNARASRI C, KOSITGITTIVONG D, JULIEN P Y. Model of flow over spillways by computational fluid dynamics [J]. Proceedings of the ICE-Water Management, 2013, 167(3):164-175.
- [6] 胡晓清,钱忠东,槐文信,等.阶梯溢流坝水流特性数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(4):20-23.
- [7] 杜金威,王均星,李辉成.阳升观台阶溢洪道水流数值模拟研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(2):110-116.
- [8] 戴会超,杨文俊.三峡工程明渠导流通航及数值实验研究概述[J].水力发电,2004,30(7):17-19.
- [9] 梁日新,高仪生.枕头坝导流明渠子围堰防渗抗冲设计与施工[J].人民长江,2012,43(14):67-69.
- [10] 彭 杨,张红武.分期导流围堰束窄河床二维水流特性模拟及分析[J].水力发电学报,2013,32(4):71-76.
- [11] 贺昌海,陈 辉,刘 全.基于CATIA建模的导流工程三维数值模拟研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(4):422-428.
- [12] 李 瑛,林楚凌,惠建伟,等.邕宁水利枢纽一期临时土石围堰施工仿真及BIM可视化[J].中国农村水利水电,2020(5):92-97,102.