

程的影响。在空间上,识别出了东大路中段管道堵塞对城区淹没状况的不利影响最大;在堵塞程度上,管道堵塞程度达到 20% 后的影响明显增大。随着重现期的增加,管道堵塞对最大淹没水深、峰现时间和淹没历时的贡献比例均基本表现为先增大后减小。其中,最大淹没水深和峰现时间对管道堵塞不敏感,而在 10 a 降雨重现期以上,淹没历时对管道堵塞十分敏感。

(3) 定量研究了排水口安装防倒灌拍门对城市水动力过程的作用。安装拍门后,各重现期的最大淹没水深和最大淹没面积均略有减小;拍门最大的作用是有效缩短了城区重点区域的平均淹没历时,在 20、50 和 100 a 降雨重现期下,拍门对缩短淹没历时的贡献率分别为 13.5%、5.4% 与 6.9%,表明安装拍门对减轻城区重点区域高降雨重现期下的淹没程度有明显的作

#### 参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491.
- [3] 夏军,张永勇,张印,等. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 1-5.
- [4] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 84-93.
- [5] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62-72.
- [6] 薛偲琦,张瑛,李一平,等. 基于 SWMM 的南京市内秦淮河中段管网排水能力分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 169-173.
- [7] 黄子千,庞博,任梅芳,等. 基于 InfoWorks ICM 的济南市少年路暴雨内涝模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 160-166.
- [8] 任梅芳,徐宗学,初祁,等. 济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 9-15.
- [9] ZHOU Qianqian, REN Yi, XU Miaomiao, et al. Adaptation to urbanization impacts on drainage in the city of Hohhot, China[J]. Water Science & Technology, 2016, 73(1): 167-175.
- [10] MEIERDIERCKS K L, SMITH J A, BAECK M L, et al. Analyses of urban drainage network structure and its impact on hydrologic response[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(5): 932-943.
- [11] 吕恒,倪广恒,田富强. 排水管网结构概化对城市暴雨洪水模拟的影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 99-106.
- [12] OCHOA-RODRIGUEZ S, WANG Lipen, GIRE S A, et al. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 389-407.
- [13] 石赟赟,万东辉,陈黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 57-60.
- [14] JANG J H, CHANG T H, CHEN Weibo. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 168-180.
- [15] 罗文兵,王修贵,史德亮,等. 平原湖区外江水位变化对排涝流量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 126-132.
- [16] 姜容,邵银霞,李光焱. 外河对城市排水管网影响的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2017, 43(10): 94-98.
- [17] 黄秋森. BTOPMC 与 FLO2D 耦合模型在小流域洪水预报中的应用[D]. 北京: 北京师范大学, 2018.
- [18] 余富强,鱼京善,蒋卫威,等. 梅溪流域“莫兰蒂”台风暴雨洪水分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 5-8.
- [19] 吴碧琼,周理,黎小东,等. 基于 BTOPMC 的无资料区水文模拟及相似性分析[J]. 人民长江, 2015, 46(4): 21-25.
- [20] 程艳,黎小东,吴碧琼,等. BTOPMC 模型在无资料地区的径流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 46-49.
- [21] PENG S H, LU S C. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in Southeastern Taiwan during Typhoon Morakot [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(2): 207-218.
- [22] 周方录,黄金柏,王斌. 基于栅格的不规则断面水深-流量关系曲线确定方法[J]. 水资源研究, 2013, 2(2): 109-113.
- [23] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

# 基于施工能力的过水围堰—隧洞导流方案多目标优化

董正宇<sup>1</sup>, 侍克斌<sup>1</sup>, 白现军<sup>2</sup>, 刁海鹏<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 葛洲坝新疆工程局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 通过分析工程对于工期、应力、防洪的要求建立过水围堰的多目标决策模型,采用单纯形法且不断调整摄动权重求得 pareto 解。通过近似理想点排序法,对不同施工速度对应的非劣解集进行排序,选择每个施工速度对应的最优决策方案,根据施工速度限制选出最终决策方案。运用该模型采用关键工作窗口期的限制条件模拟了过水围堰工期限制,并根据围堰的施工技术特点分析了浇筑强度与单位造价之间的关系,确定较优的施工速度后得到最终决策方案。该模型考虑了施工方的能力限制,有利于设计方综合施工方能力后得出较优方案。

**关键词:** 过水围堰; 多目标优化; 施工导流; 隧洞导流; 贫胶混凝土围堰

中图分类号:TV551

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)01-0151-07

## Multi-objective optimization of overflow cofferdam – tunnel diversion scheme based on construction capability

DONG Zhengyu<sup>1</sup>, SHI Kebin<sup>1</sup>, BAI Xianjun<sup>2</sup>, DIAO Haipeng<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Gezhouba Xinjiang Engineering Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

**Abstract:** A multi-objective decision-making model of the overflow cofferdam was established based on the analysis of the requirements for construction time, stress, and flood control, then the pareto solution was obtained using the simplex method by constantly perturbing the weights. The approximate aspiration dot arrange method was used to sort the non-inferior solution sets corresponding to different construction speeds, through which the optimal decision-making plan for each construction speed was determined, and the final decision-making plan was then selected according to the construction speed limit. This model uses the constraints of the critical activity window period to simulate the construction time limit of the overflow cofferdam, and analyzes the relationship between the pouring intensity and the unit cost according to the construction technical characteristics of the cofferdam, and obtains the final decision-making plan after determining the optimal construction speed. This model takes into account the capability constraints of the construction party, which is conducive to the decision-making of the design party. They can formulate an optimized scheme after considering the capabilities of the construction party.

**Key words:** overflow cofferdam; multi-objective optimization; construction diversion; tunnel diversion; cemented sand; gravel and rock (CSGR) cofferdam

## 1 研究背景

施工导流是水利枢纽工程建设中的一个重要环节。在导流方案选择中,优化过水围堰导流方式往往能够在不延长或者少量延长永久建筑物施工工期

的情况下给水利工程施工带来显著的效益<sup>[1]</sup>。

近年来,随着贫胶渣砾料(胶结颗粒料)(cemented sand, gravel and rock, CSGR)筑坝材料的发展,针对其性能<sup>[2-4]</sup>、经济<sup>[5]</sup>、环保<sup>[6]</sup>、应用<sup>[7-8]</sup>等方面的研究也在不断加强。目前国内已建成了福建宁

收稿日期:2020-06-06; 修回日期:2020-10-26

基金项目:新疆水利科技专项资金项目(T201801);“水利工程重点学科”研究项目(SLXK-YJS-2018-03);自治区高校科研计划重点项目(XJEDU2016I022)

作者简介:董正宇(1995-),男,浙江绍兴人,在读博士研究生,主要从事水利水电工程专业的科研工作。

通讯作者:侍克斌(1957-),男,甘肃民勤人,教授,博士,博士生导师,主要从事水利水电工程专业的教学、科研工作。

德洪口水电站上游主围堰、福建尤溪街水电站下游过水围堰、云南大理功果桥水电站上游围堰等多座贫胶渣砾料碾压混凝土围堰<sup>[9-12]</sup>。同时《贫胶渣砾料碾压混凝土施工导则》(DL/T 5264-2011)<sup>[13]</sup>和《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL 678-2014)<sup>[14]</sup>等也先后出版,贫胶渣砾料(胶结颗粒料)围堰的应用逐渐引起重视。新堰型的出现只有与导流建筑物组成一个系统工程,并通过联合优化才能带来良好的经济效益<sup>[15]</sup>。以往人们对过水围堰工程做系统优化时,设计方会更多考虑业主的利益即工期和造价,却往往忽略了施工方的能力限制,造成设计返工以及施工安排困难等问题。本文通过构建多目标决策模型,结合规范和施工方能力,对某高碾压混凝土坝施工中的贫胶渣砾料混凝土过水围堰-隧洞导流方案进行了优化研究。

## 2 模型的建立

### 2.1 方法

针对在设计过程中需综合考虑过水围堰堰高与导流洞直径的关系问题,本研究采用多目标优化方法,根据过水围堰高度和导流洞直径与目标之间的函数关系,建立多目标数学模型。同时考虑到设计

规范、施工能力、工程造价等限制,建立约束条件。最后根据堰高、洞径与目标之间的函数关系和堰高、洞径的约束条件,求取堰高和洞径的 pareto 解。

### 2.2 目标函数

为了优化导流方案,现选择两个优化目标,分别为工程造价目标和施工工期目标,建立它们各自的目标函数。

导流洞为圆形隧洞(见图1),设导流洞直径为  $D$  (m),导流洞衬砌厚度为  $\delta$  (m),导流洞开挖断面面积为  $S_{dw}$  ( $m^2$ ),导流洞混凝土衬砌断面面积为  $S_{dc}$  ( $m^2$ ),则有:

$$S_{dw} = \pi \left( \frac{D}{2} + \delta \right)^2 \tag{1}$$

$$S_{dc} = \pi (\delta^2 + D \cdot \delta) \tag{2}$$

过水围堰以洪口水电站上游主围堰为蓝本,设围堰典型断面堰高为  $h$  (m),围堰典型断面堰底宽度为  $b$  (m),堰顶宽度为  $a$  (m),围堰上游坡度为  $1:m_1$ ,下游坡度为  $1:m_2$ ,右岸边坡坡度为  $\alpha_1$  ( $^\circ$ ),左岸边坡坡度为  $\alpha_2$  ( $^\circ$ ),河床宽度为  $t$  (m),围堰体积为  $V_y$  ( $m^3$ ),根据围堰体积计算简图(见图2)由公式(3)、(4)计算出围堰体积。

$$b = a + h(m_1 + m_2) \tag{3}$$

$$V_y = \frac{1}{2} b \left( h + \frac{ah}{b-a} \right) \left[ \left( h + \frac{ah}{b-a} \right) (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) + t \right] + \frac{a^3 h}{3(b-a)} \left( \frac{1}{\tan\alpha_1} + \frac{1}{\tan\alpha_2} \right) - \frac{1}{3} b \left( h + \frac{ah}{b-a} \right)^2 (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) - \frac{ah}{2b} \left[ \left( h + \frac{ah}{b-a} \right) (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) + t \right] \tag{4}$$

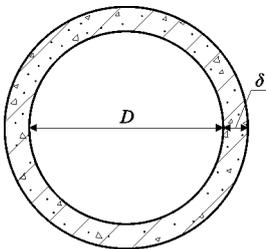


图1 导流洞横断面示意图

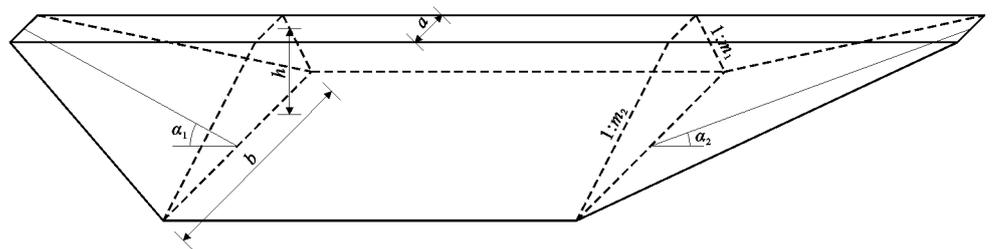


图2 围堰体积计算简图

设贫胶混凝土围堰建造费用为  $C_y$  (元),单价为  $c_y$  (元/ $m^3$ );导流洞开挖费用为  $C_{dw}$  (元),单价为  $c_{dw}$  (元/ $m^3$ );导流洞衬砌费用为  $C_{dc}$  (元),单价为  $c_{dc}$  (元/ $m^3$ );导流洞长度为  $L$  (m),总施工费用为  $C$ ,且假设根据围岩等级不同,导流洞对应的衬砌厚度也不同,则有:

$$C_y = c_y \cdot V_y \tag{5}$$

$$C_{dw} = c_{dw} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \left( \frac{D}{2} + \delta_i \right)^2 \cdot L_i \tag{6}$$

$$C_{dc} = c_{dc} \cdot \sum_{i=1}^n \pi (\delta_i^2 + D \cdot \delta_i) \cdot L_i \tag{7}$$

$$C = C_y + C_{dw} + C_{dc} \tag{8}$$

设贫胶混凝土围堰填筑总方量为  $V_y$  ( $m^3$ ),日平均浇筑量为  $g_y$  ( $m^3/d$ ),施工期为  $G_y$  (d);导流洞开挖速度为  $g_{dw}$  ( $m/d$ ),施工期为  $G_{dw}$  (d);导流洞衬砌施工速度为  $g_{dc}$  ( $m/d$ ),施工期为  $G_{dc}$  (d);导流洞长度为  $L$  (m),总施工期为  $G$  (d),且假设根据围岩等级不同,导流洞对应的开挖速度和衬砌施工速度也

不相同,则有:

$$G_y = V_y/g_y \quad (9)$$

$$G_{dw} = \sum_{i=1}^n L_i/g_{idw} \quad (10)$$

$$G_{dc} = \sum_{i=1}^n L_i/g_{idc} \quad (11)$$

$$G = G_y + G_{dw} + G_{dc} \quad (12)$$

### 3 约束条件

#### 3.1 贫胶混凝土围堰应力限制条件

根据《水电工程围堰设计导则》(NB/T 35006-2013)<sup>[16]</sup>的规定,结合贫胶混凝土类似工程经验,做出上、下游面的垂直正应力不大于 0.75 MPa,且上、下游垂直正应力不出现负值的限制。假设围堰的最危险横断面为典型断面即主河床断面,上游变态混凝土防渗效果良好,断面上无扬压力作用,围堰使用年限较短不产生泥沙堆积,无泥沙压力。利用任意四边形形心计算公式计算围堰断面形心点坐标,并计算出上、下游面的垂直正应力:

$$y_c = \frac{bh + 2ah}{3(b + a)} \quad (13)$$

$$x_c = \frac{2ab + 2b^2 - a^2 - 2ahm_1 - bhm_1}{3(b + a)} \quad (14)$$

$$\sum W = \frac{1}{2}h^2m_1\gamma_w + \frac{1}{2}h(a + b)\gamma_c \quad (15)$$

$$\sum M = \frac{1}{2}h^2\gamma_w\left(y_c - \frac{1}{3}h\right) + \frac{1}{2}h^2m_1\gamma_w\left(b - \frac{1}{3}m_1h - x_c\right) \quad (16)$$

$$\sigma_y^u = \frac{\sum W}{T} + \frac{6\sum M}{T^2} \quad (17)$$

$$\sigma_y^d = \frac{\sum W}{T} - \frac{6\sum M}{T^2} \quad (18)$$

式中: $a$ 、 $b$ 分别为上游围堰堰顶、堰底宽度,m;上游围堰迎水面、背水面斜率分别为 $1:m_1$ 、 $1:m_2$ ;  $x_c$ 、 $y_c$ 分别为围堰计算断面形心的 $x$ 轴、 $y$ 轴坐标,m;  $\sum W$ 为计算断面上的全部垂直力之和,以向下为正,kN;  $\sum M$ 为计算断面上的垂直力和水平力对计算断面形心的力矩之和,以逆时针方向为正,kN·m;  $\gamma_w$ 为水的容重,一般为 $9.8 \text{ kN/m}^3$ ;  $T$ 为计算断面沿上下游的长度,m;  $\sigma_y^u$ 、 $\sigma_y^d$ 分别为上、下游面的垂直正应力,MPa。

#### 3.2 导流洞半径与围堰高度关联限制条件

在防洪标准和挡水时间一定的情况下,假设导

流洞进口底部高程为河床底部高程 $Z_d$ (m),根据同类工程导流洞设计经验,选取多个合适的导流洞洞径 $D$ (m)并经调洪演算推求出与之对应的围堰堰顶高程 $Z_y$ (m)。选取4个洞径 $D$ 和与之对应的围堰堰顶高程 $Z_y$ 代入拉格朗日插值公式得到 $f(D)$ 函数。根据坝址处河道的地形与含泥量调整导流洞进口底部高程, $H_d$ (m)为调整后的导流洞进口底部高程,考虑 $H_d$ 后得到围堰堰顶高程函数 $Z_y(D, H_d)$ 如公式(19)所示。堰顶高程 $Z_y$ 与河床底部高程 $Z_d$ 之差为围堰高度 $h$ (m),围堰高度 $h$ 、导流洞洞径 $D$ 、调整后的导流洞进口底部高程 $H_d$ 三者之间的关联限制如公式(20)所示。

$$Z_y(D, H_d) = f(D) + H_d = \sum_{j=0}^4 \left( \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^4 \frac{(D - D_i)}{(D_j - D_i)} \right) \cdot Z_{y_j} + H_d \quad (19)$$

$$h = Z_y(D, H_d) - Z_d = f(D) + H_d - Z_d \quad (20)$$

#### 3.3 施工窗口期与施工速度限制条件

过水围堰能否按时填筑到设计高程,对后续永久建筑物施工起着决定性作用。过水围堰填筑时间通常需限定在一个枯水期内,填筑到一定高程的围堰将保证永久建筑物的施工条件和施工工期。因此将过水围堰堰体填筑确定为关键工作,围堰堰体填筑工期有着严格限制,必须保证在施工窗口期内完成。

相对有着严格要求的施工工期,施工速度则由施工场地、施工机械和施工组织等条件决定。施工速度与造价之间有着复杂的关系,假设当施工速度在一定区间内时,其快慢对造价没有影响,当 $G_x$ 为施工窗口期时,则有:

$$V_y/g_y \leq G_x \quad (21)$$

#### 3.4 导流建筑物尺寸限制

导流洞一般采用钻爆法施工,受施工工艺限制,圆形断面隧洞直径不宜小于 $2 \text{ m}$ <sup>[17]</sup>。另一方面需要根据围岩等级和施工期洪水流量来设置导流洞数量和洞径范围。导流洞进口底部高程需要根据河流含泥量、地形、地质来确定。

#### 3.5 日平均浇筑量的限制

贫胶混凝土在制备工艺上与常态混凝土有较大的区别,贫胶混凝土无需采用成套的固定设备,例如砂石料加工系统、拌合站、拌合楼等,其单位价格不会随生产速度加快呈阶梯式提高。常态混凝土的拌合完全依靠固定设备(拌合站和拌合楼),例如HL360拌合楼可供高峰浇筑强度为 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 、4 000

$\text{m}^3/\text{d}$ 、 $90\,000\ \text{m}^3/\text{月}$ 、 $810\,000\ \text{m}^3/\text{a}$ ；HL240 拌合楼可供高峰浇筑强度为  $200\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $3\,000\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $75\,000\ \text{m}^3/\text{月}$ 、 $675\,000\ \text{m}^3/\text{a}$ ，提高常态混凝土高峰浇筑强度只能增大固定设备规模及配套设施。贫胶混凝土技术采用添加少量胶凝材料的河床砂砾石和弃渣，通过挖掘机进行拌制后入仓、碾压完成浇筑。提高贫胶混凝土高峰浇筑强度无需增加或少量增加固定设备，加强挖掘机、运输机械、碾压机械等机械投入即可。

由于贫胶混凝土施工工艺相比常态混凝土和碾压混凝土有所简化，贫胶混凝土单位造价  $c_y$  不随着日平均浇筑量  $g_y$  的增加而增大，只根据工作面设置最大的日平均浇筑量。

## 4 模型计算

对于多目标规划，有直接法和间接法两大类。对于多目标多变量问题，一般采用间接法来求解。间接法一般分为3个大方向：第1种是将多目标转化为单目标来进行计算；第2种是将多目标化为多个单目标的问题；第3种是已经确定了多目标的每个目标值，要求在约束条件下逼近目标值。

由于水利工程的复杂性，本文采取第1种方法来计算，采用加权法将多目标转化为单目标问题，其表达式为：

$$\min F = \min \{ \omega_1 C + \omega_2 G \} \quad (22)$$

式中： $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为成本权重和工期权重。

$\omega_1$  和  $\omega_2$  在一定范围内变化，变化范围为  $(1, 2, 3, \dots, n)$ 。在实际中根据工程情况，比较两个目标的重要性，估计出变化范围。根据水利工程过水围堰的特性，若施工导流进度延后对工程总进度不影响或较小影响，则选择的权重范围为  $\omega_1 : \omega_2 = (1:1)$ 、 $(1:2)$ 、 $(1:3)$ 、 $\dots$ 、 $(1:n)$ ；若施工导流进度正处于整个工程进度的关键路线上，则选择的权重范围为  $\omega_1 : \omega_2 = (1:1)$ 、 $(2:1)$ 、 $(3:1)$ 、 $\dots$ 、 $(n:1)$ 。选取权重变化范围后，将  $\omega_1 : \omega_2$  的比值转化为标准比值，满足  $\omega_1 + \omega_2 = 1$  的条件，即  $\omega_1 : \omega_2 = \left( \frac{1}{n+1} : \frac{n}{n+1} \right)$ 、 $\dots$ 、 $(0.25 : 0.75)$ 、 $(0.33 : 0.67)$ 、 $(0.50 : 0.50)$ 、 $(0.67 : 0.33)$ 、 $(0.75 : 0.25)$ 、 $\dots$ 、 $\left( \frac{n}{n+1} : \frac{1}{n+1} \right)$ ，通过不断变化权重，求出非劣解集。

## 5 实际算例

### 5.1 工程概况

某水利枢纽工程需修建在“U”形峡谷中，坝址

区地形属于低山丘陵区，河床地形较为平缓，宽  $50 \sim 80\ \text{m}$ ，坡降小于  $0.5\%$ 。河床右岸边坡均较为陡直，岸坡坡度在  $70^\circ \sim 80^\circ$  之间，高程在  $460 \sim 800\ \text{m}$  之间，施工场地布置困难。河床左岸坡度较缓，岸坡坡度在  $30^\circ \sim 40^\circ$  之间，坡地上多为厚层松散物质覆盖，高程在  $460 \sim 600\ \text{m}$  之间。

坝址所在位置枯水期和汛期洪峰流量相差较大，10年一遇的枯水期洪峰流量为  $1\,616\ \text{m}^3/\text{s}$ ，汛期洪峰流量为  $6\,650\ \text{m}^3/\text{s}$ ，洪枯比达到  $4.12$ ，施工导流考虑采用过水围堰方案进行。主体工程拦河坝采用曲线型碾压混凝土重力坝方案，最大坝高  $108\ \text{m}$ ，为2级建筑物，根据《水利水电工程施工组织设计规范》(SL 303-2017)中的导流标准，围堰的级别为4级，采用贫胶混凝土过水围堰方案，堰顶宽度取  $5\ \text{m}$ ，上游边坡为  $1:0.3$ ，下游边坡为  $1:1.0^{[17]}$ 。根据该工程的可行性研究报告结合类似工程经验，贫胶混凝土围堰单位造价  $c_y = 66.33\ \text{元}/\text{m}^3$ ，导流洞单位挖方造价  $c_{du} = 183.26\ \text{元}/\text{m}^3$ ，导流洞单位衬砌造价  $c_{dc} = 2\,482.42\ \text{元}/\text{m}^3$ ，贫胶混凝土围堰日平均浇筑量  $g_y$  最大值为  $3\,500\ \text{m}^3/\text{d}$ ，导流洞平均进尺速度  $g_{du}$  以围岩类型决定，该工程欲设计两条导流洞且两条导流洞洞线基本呈平行布置，两条导流洞总长为  $1\,276\ \text{m}$ ，导流洞Ⅲ类围岩比例约占  $30\%$ ，Ⅳ类约占  $40\%$ ，Ⅴ类约占  $30\%$ 。导流洞采取双向掘进，根据《水工建筑物地下开挖工程施工规范》(SL 378-2007)中关于平洞循环进尺的取值范围，并结合该工程得出Ⅲ类围岩隧洞进尺为  $7\ \text{m}/\text{d}$ ，Ⅳ类围岩  $5\ \text{m}/\text{d}$ ，Ⅴ类围岩  $3\ \text{m}/\text{d}^{[18]}$ 。由于导流洞的围岩类型不同，该工程的Ⅲ类围岩全断面混凝土衬砌厚度为  $60\ \text{cm}$ ，Ⅳ类围岩全断面混凝土衬砌厚度为  $80\ \text{cm}$ ，Ⅴ类围岩全断面混凝土衬砌厚度为  $100\ \text{cm}$ 。导流洞全断面混凝土衬砌施工速度  $g_{dc} = 8\ \text{m}/\text{d}$ 。

### 5.2 造价和工期目标函数的建立

将已确定的各个参数代入公式(5)~(7)、(9)~(11)中进行计算，再由公式(8)和(12)分别计算得到总施工造价和总工期。

### 5.3 约束条件的建立

施工导流采用隧洞导流和过水围堰枯水期挡水汛期过水方案。固定导流洞进口底部高程  $H_d$  为  $454\ \text{m}$ ，导流洞按圆形断面进行了断面直径对应设计洪水高程的调洪计算，过水围堰不需要安全超高，设计枯水期洪水高程与波浪爬高之和即为堰顶高程。经计算得出不同直径圆形断面导流洞对应的围堰高度见表1。

表 1 实例工程不同直径圆形断面导流洞对应的围堰高度

方案	对应的围堰高度		m
	导流洞直径	设计洪水高程	
方案 1	8.5	486.80	42.55
方案 2	9.0	481.10	36.85
方案 3	9.5	477.12	32.87
方案 4	10.0	474.25	30.00
方案 5	10.5	472.20	27.95
方案 6	11.0	470.69	26.44

由于防洪标准相同,堰顶高程与导流洞洞径有一定关系,采用拉格朗日插值公式来表示导流洞直径与堰顶高程之间的关系。选取表 1 中 8.5、9.5、10.0 和 11.0 m 导流洞直径及其对应的堰顶高程代入公式(19)~(20)并化简后求得如下公式:

$$Z(D, H_d) = 502.40D^3 - 14064.57D^2 + 130943.84D - 404906.10 - H_d \quad (23)$$

通过拉格朗日插值方程计算后与调洪演算得到的结果进行对比分析,结果见表 2。由表 2 可知,拉格朗日插值法计算得到的堰顶高程略高于调洪演算结果,两者相差在 10 cm 以内,不影响方案的目标。

表 2 不同导流洞直径下拉格朗日插值法与调洪演算计算围堰高度结果对比

导流洞直径	围堰高度		差值
	拉格朗日插值法	调洪演算	
9.0	36.93	36.85	+0.08
10.5	27.97	27.95	+0.02

表 3 不同摄动权重和日平均浇筑量下围堰高度(h)与导流洞直径(D)的非劣解集

摄动权重 $\omega_1 : \omega_2$	日平均浇筑量( $m^3/d$ )															
	1500		2000		2500		3000		3500		4000		4500		5000	
	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>D</i>
0.90: 0.10	27.0	10.8	30.4	9.9	33.2	9.4	35.7	9.1	37.4	9.0	37.4	8.9	37.5	8.9	37.5	8.9
0.75: 0.25	27.0	10.8	30.4	9.9	33.2	9.4	35.7	9.1	36.6	9.0	36.8	9.0	36.9	9.0	37.0	9.0
0.67: 0.33	27.0	10.8	30.4	9.9	33.2	9.4	35.7	9.1	36.2	9.1	36.3	9.1	36.5	9.0	36.6	9.0
0.50: 0.50	27.0	10.8	30.4	9.9	33.2	9.4	34.5	9.3	34.9	9.2	35.1	9.2	35.4	9.2	35.6	9.1
0.33: 0.67	27.0	10.8	30.4	9.9	31.9	9.6	32.5	9.6	33.0	9.5	33.4	9.4	33.7	9.4	34.0	9.3
0.25: 0.75	27.0	10.8	29.9	10.0	30.7	9.9	31.3	9.8	31.8	9.7	32.2	9.6	32.6	9.5	32.9	9.5
0.10: 0.90	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0	23.5	12.0

由表 3 可看出,随着日平均浇筑量的增加,围堰

根据混凝土围堰应力限制条件,将工程背景中相关参数代入公式(13)~(14),再将公式(13)~(14)代入公式(15)~(16),最终将公式(15)~(16)代入公式(17)~(18),得出上游面垂直正应力 $\sigma_y^u$ 和下游面垂直正应力 $\sigma_y^d$ 的表达式。前文中已指出,贫胶混凝土材料在上、下游面的垂直正应力不大于 0.75 MPa,且上、下游垂直正应力不出现负值,因而得出限制条件式(24)~(25)。

$$0 \leq \sigma_y^u \leq 0.75 \text{ MPa} \quad (24)$$

$$0 \leq \sigma_y^d \leq 0.75 \text{ MPa} \quad (25)$$

该工程过水围堰需要在洪水期来临之前完成,计划在 10 月初开始填筑上游土石围堰及下游围堰;10 月中旬完成闭气,开始上游贫胶混凝土围堰的施工,1 月底上游贫胶混凝土围堰完工,整个贫胶混凝土围堰工期即施工窗口期  $G_x = 75 \text{ d}$ ,所以根据公式(21)得出:

$$V_y/g_y \leq 75 \text{ d} \quad (26)$$

该工程坝址处河道底部高程为 452 m,故对导流洞进口底部高程  $H_d$  设置下限为 452 m,即进口底部高程与河床同高。导流洞为圆形,洞径应不小于 2 m,由于地质和施工技术限制,洞径最大限制为 12 m,所以得出:

$$H_d \geq 452 \text{ m} \quad (27)$$

$$2 \text{ m} \leq D \leq 12 \text{ m} \quad (28)$$

## 6 结果与分析

### 6.1 非劣解集的分析

不同摄动权重和日平均浇筑量下围堰高度( $h$ )与导流洞直径( $D$ )的非劣解集如表 3 所示。

高度上限也随之增加;围堰高度上限越大,摄动权重

$\omega_1 : \omega_2$  值的可变化范围也越大。这证明日平均浇筑量的增大可缩短施工导流阶段的总工期,根据经验一般工期缩短不超过 20%<sup>[19-20]</sup>。公式(21)表明日平均浇筑量和施工窗口期两个条件决定着围堰高度上限,在施工窗口期一定的情况下,围堰高度上限及总造价与日平均浇筑量的关系见表 4。

表 4 围堰高度上限及总造价与日平均浇筑量的关系

日平均浇筑量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	围堰高度 上限/m	造价/ $10^4$ 元
1500	27.01	12781.3
2000	30.37	11945.4
2500	33.24	11623.8
3000	35.72	11501.8
3500	37.98	11458.9
4000	39.98	11492.8
4500	41.85	11554.9
5000	43.51	11653.3

当成本权重与工期权重相同即  $\omega_1 : \omega_2 = 0.5 : 0.5$  时,围堰高度及导流洞直径随日平均浇筑量的变化曲线如图 3 所示。分析图 3 可知,日平均浇筑量在  $1\ 500 \sim 2\ 500 \text{ m}^3/\text{d}$  时,围堰高度和导流洞直径对日平均浇筑量变化敏感,日平均浇筑量平均增加  $100 \text{ m}^3/\text{d}$ ,则围堰高度就增加  $0.621 \text{ m}$ ,相应导流洞直径就减小  $0.135 \text{ m}$ ;日平均浇筑量在  $2\ 500 \sim 3\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$  时,围堰高度和导流洞直径对日平均浇筑量的变化敏感度降低,日平均浇筑量平均增加  $100 \text{ m}^3/\text{d}$ ,则围堰高度就增加  $0.254 \text{ m}$ ,相应导流洞直径就减小  $0.034 \text{ m}$ ;日平均浇筑量大于  $3\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$  时,围堰高度和导流洞直径对日平均浇筑量变化不敏感。

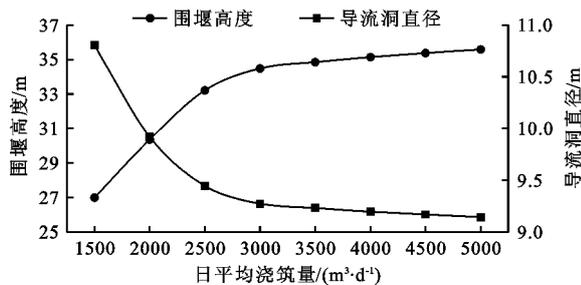


图 3 围堰高度及导流洞直径随日平均浇筑量的变化曲线 ( $\omega_1 : \omega_2 = 0.5 : 0.5$ )

### 6.2 方案决策

不同的日平均浇筑量方案之间会出现不同的方

案对应不同的目标值,故无法进行比较,应选择一个合适的日平均浇筑量,对在该日平均浇筑量下的非劣解进行决策。由于方案数量较多,根据敏感度和工期压缩限制,选取日平均浇筑量在  $1\ 500 \sim 3\ 500 \text{ m}^3/\text{d}$  的方案为备选方案。在 1 个日平均浇筑量对应的非劣解集中决策出 1 个决策者最满意的方案,即 1 个日平均浇筑量对应 1 个最优决策方案。

决策者通常希望可以在决策中避免偏好的影响,本文利用近似理想点排序法来选择合适的方案<sup>[21]</sup>。导流方案的近似理想点排序法就是分析导流建筑物(围堰、导流洞)的工期和造价与理想点之间的加权距离,并按照加权距离排序选择。将求得的非劣解记为  $A_j$ ,组成 2 行  $j$  列的矩阵  $F$ 。由于各方案目标值的单位不同,即价格不可公度,为了方便后面的计算与分析,将各元素作公式(30) ~ (31) 的变换,最终得到规范化矩阵  $F_1$ 。

$$F = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_j \\ C(A_1) & C(A_2) & \cdots & C(A_j) \\ G(A_1) & G(A_2) & \cdots & G(A_j) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$r_{1j} = C(A_j) / \left[ \sum_{j=1}^n C^2(A_j) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$r_{2j} = G(A_j) / \left[ \sum_{j=1}^n G^2(A_j) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_j \\ r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \end{bmatrix} \quad (32)$$

由于寻找理想点较为困难,故在备选方案中选取最优值,将最优值看作近似理想值  $I^*$ ,近似理想值求取见公式(33)。

$$I^* \{ \min_j r_{ij}; C^*; G^*; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, p \} \quad (33)$$

已知近似理想点  $I^*$ ,计算方案  $A_j$  对应的造价目标函数  $C(A_j)$ 、工期目标函数  $G(A_j)$  与近似理想点  $I^*$  之间的加权距离,即近似度  $a_j$  为:

$$a_j = \{ [C(A_j) - C^*]^2 + [G(A_j) - G^*]^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (34)$$

根据近似度  $a_j$  的大小进行排序,确定多目标的最佳均衡解,并选出最优决策方案。计算得出不同日平均浇筑量相应的不同最优决策方案如表 5 所示,选择合适的日平均浇筑量即可选出所对应的最终决策方案。施工方认为日平均浇筑量为  $3\ 500 \text{ m}^3/\text{d}$  时是合适的,因而最终决策方案为:围堰高度  $31.8 \text{ m}$ ,导流洞直径  $9.7 \text{ m}$ (表 5)。

表5 不同日平均浇筑量相应的不同最优决策方案

日平均浇筑量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	围堰高度/m	导流洞直径/m	工期/d	造价/ $10^4$ 元	近似度
1500	27.0	10.8	510	12781.12	0.00333
2000	29.9	10.0	507	12021.69	0.00174
2500	30.7	9.9	496	11901.35	0.00106
3000	31.3	9.8	488	11818.41	0.00068
3500	31.8	9.7	482	11758.07	0.00045

## 7 结论

本文采用建立多目标优化模型,按1个日平均浇筑量对应1个非劣解集,再利用近似理想点排序法选出每个日平均浇筑量对应的最优决策方案,最终根据施工方给出的施工能力得到最终决策方案,结论如下:

(1)通过拉格朗日插值公式建立了导流洞直径、围堰高度、导流洞进口底部高程三者之间的关系,避免了频繁进行复杂的调洪演算。

(2)通过约束条件的建立,将实际限制条件(工期、应力、建筑物规模等)纳入多目标模型加以解决,节约了设计者大量的时间。

(3)在围堰工期固定的情况下,分析出对围堰堰高影响较为显著的日平均浇筑能力范围值,并在该日平均浇筑能力区间内计算非劣解集,减少了计算工作量。

(4)通过近似理想点法求出每个日平均浇筑能力对应的最优方案,最终依据施工方认为合适的施工速度确定最终决策方案,减少了设计方和施工方之间的沟通障碍。

采用多目标模型便于围堰和导流洞方案的决策,同时也存在一些不足:

(1)围堰高度、导流洞直径和导流洞底板高程三者的关系没有按调洪演算推导而是简单采用拉格朗日插值公式来表示。

(2)在文中导流洞底板高程降低只是简单降低相同高度的围堰高程,没有考虑到对河道截流和后期淤积的影响。

(3)施工速度没有经过技术经济分析,只是简单假设在一定范围内施工速度对造价没有影响。

### 参考文献:

[1] 罗启北,郭胜娟,汤伟. 过水土石坝综述[J]. 水利科技

与经济, 2010, 16(9):1023-1025.

- [2] 闫林,何建新,杨海华. 富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1):197-202.
- [3] 戈雪良,陆采荣,张金海,等. 胶凝砂砾石过水围堰填筑材料特性研究[J]. 水力发电, 2019,45(6):46-49+55.
- [4] 沈琦,冯彦. CSG 贫胶渣砾料碾压混凝土材料试验研究[J]. 价值工程, 2016, 35(4):114-116.
- [5] 贾世锋. 胶凝砂砾石坝经济性研究[J]. 水利技术监督, 2017(6):111-113+169.
- [6] JIA Jinsheng, LINO M, JIN Feng, et al. The cemented material dam:A new, environmentally friendly type of dam [J]. Engineering, 2016, 2(4):220-235.
- [7] 陈武. 胶凝砂砾石材料在围堰工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2011(2):35-41.
- [8] 贾金生,刘宁,郑瑾莹,等. 胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J]. 水利学报, 2016, 47(3):315-323.
- [9] 赖福梁. 洪口水电站贫胶粗粒料围堰设计[J]. 水利科技, 2011(4):48-51.
- [10] 刘志明. 胶凝砂砾石坝基本剖面研究[J]. 水利规划与设计, 2016(11):1-2+55.
- [11] 毛益飞. 福建洪口水电站上游 CSG 围堰施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2012(17):80-81.
- [12] 张勇智,龚永生. 大华桥水电站胶凝砂砾石过水围堰的“一体化”管理[J]. 水力发电,2019,45(6):10-12+34.
- [13] 国家能源局. 贫胶渣砾料碾压混凝土施工导则:DL/T 5264-2011[S]. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [14] 中华人民共和国水利部. 胶结颗粒料筑坝技术导则:SL 678-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.
- [15] 唐晓阳. 过水围堰隧洞导流方案洞径及围堰高度的多目标择优[J]. 水力发电,1994(8):36-40+61.
- [16] 国家能源局. 水电工程围堰设计导则:NB/T 35006-2013[S]. 北京:中国电力出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工组织设计规范:SL 303-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.
- [18] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物地下开挖工程施工规范:SL 378-2007[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [19] 李星梅,乞建勋,苏志雄,等. 基于机动时间的项目工期单因素不确定性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12):1466-1470.
- [20] 张立辉,周远成,乞建勋. 总时差定理与最低成本压缩工期问题的一种新方法[J]. 系统管理学报, 2009, 18(4):443-449.
- [21] 刘瑞,鲍学英. 基于熵值修正的 G2 法的绿色施工节水措施效益综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3):169-174+179.