

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220279

# 基于施工过程仿真的高碾压混凝土坝施工工艺研究

董京艳, 翟建, 杨晓箫, 尤尊贤, 徐庆

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 古贤水利枢纽工程混凝土量大、工期紧, 施工工艺及并仓规划是高碾压混凝土重力坝施工的关键问题, 直接决定着施工速度和各种资源的投入, 因此引入离散事件系统仿真技术建立符合坝型特点的施工仿真模型对坝体混凝土分仓、并仓、跳仓施工过程进行模拟计算。经多方案模拟比选后推荐平斜层结合工艺及相应的仓面划分方案, 并提出仓面工艺控制准则, 为古贤工程大坝施工方案的制定提供了全方位的数据支持, 其仿真模型模拟机制亦可供其他同类型工程参考。

**关键词:** 碾压混凝土坝; 施工仿真; 平斜层工艺; 仓面划分

**中图分类号:** TV642.2; TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)03-0075-04

## 1 概况

古贤水利枢纽工程位于陕西、山西两省交界的黄河干流上, 其碾压混凝土重力坝最大坝高 215 m, 由左岸挡水坝段、溢流表孔坝段、泄洪中孔和底孔坝段、引水发电坝段、右岸挡水坝段等 39 个坝段组成, 电站装机容量 2 100 MW, 坝后式厂房, 大坝碾压混凝土量约  $1\ 387 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 常态混凝土量约  $317 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 同一高程坝体最大层面面积  $11.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 其混凝土量、仓面面积、高峰月强度等各项施工技术指标均超出已建工程的世界纪录, 该工程高坝施工是一个庞大复杂的系统工程。因此, 安排大坝施工、选择铺筑方式、划分仓面, 仓面面积控制、工期与资源匹配等, 均成为施工组织设计中亟待解决的问题。传统的 P3、P6、Project 计划方法无法精确到每一仓每一升程混凝土基本单元, 因此有必要采取科学、系统的分析方法和先进的技术手段研究坝体精细化施工以保证工程顺利实施。鉴此, 本文引入计算机仿真技术, 采用离散事件系统仿真的方法模拟一定生产能力、道路配置、入仓机械配置、层面初凝时间、升程间歇时间等约束条件下的高碾压混凝土坝坝体浇筑实施过程, 优选出海量坝块的并仓、跳仓顺序, 得出每一仓每一升程的详细施工信息, 以反映系统运行规律, 优化施工工艺及系统参数, 为类似工程提供参考。

## 2 碾压混凝土坝施工过程仿真模型构建

### 2.1 系统分析及假设条件

碾压混凝土常进行大仓面薄层连续铺筑施工, 铺筑方法可采用平层通仓法, 也可采用斜层平推法。平斜层施工工艺施工过程均受水文气象、物料供应、道路条件、导流程序等多种因素影响, 这些因素不仅自身随时间不断改变, 而且各因素之间存在复杂的时空逻辑关系, 建立仿真模型是研究的重点和难点。本文仿真模型假设条件包括: ①基坑开挖和基础处理已施工完毕; ②各上坝路的修筑不影响筑坝材料的运输, 运输系统的多条供料线互不干扰; ③不模拟料场的开采过程, 假设料场开采、建筑物开挖、砂石料制备能按计划实施; ④孔洞周围常态混凝土不再模拟其具体浇筑过程, 施工时间为用户输入的固定时间。

### 2.2 仿真模型的总体框架

仿真模型的总体框架包含数据前处理、坝体施工过程仿真及成果分析 3 大块(图 1)。数据前处理主要对大坝体型参数、生产系统参数、道路供料线及机械参数、温控间歇、气象参数等海量数据建立数据库, 施工过程仿真模型含数据初始化、并仓碾压、浇筑执行等模块, 采用主导实体时钟扫描法进行模拟, 成果分析含并仓信息分析、机械利用效率分析等模块<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2022-02-18, 修回日期: 2022-06-24

作者简介: 董京艳(1985-), 女, 高级工程师, 研究方向为施工组织管理与系统仿真, E-mail: djy5043@163.com

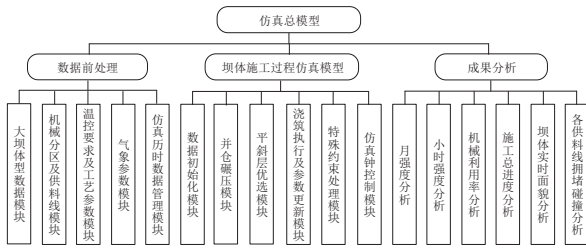


图 1 大坝施工仿真模型总体框架图

Fig. 1 General framework diagram of the dam construction simulation model

### 2.3 仓面浇筑仿真模型

仿真模拟开始时,先对各坝段数据进行初始化,赋予各坝段几何信息、初始开工时间、铺筑方式、入仓设备信息、运输强度、生产强度等,然后扫描所有坝段,找出子时钟最小坝段,放进可选仓位集。接着判断各坝段铺筑方式,若子时钟最小坝段为平层铺筑方式,则根据生产强度和运输强度的较小值计算最大并仓面积,判断哪几个坝段可以并仓,并仓条件为:①坝段相邻且底部高程相等;②属于同一机械控制区域且供料线相同;③铺筑方式相同且可同期施工。满足条件的坝段按从左岸至右岸的顺序依次并仓,且并仓坝段面积需小于等于最大允许铺筑面积,以此得出几个合并好的仓位;若子时钟最小坝段为斜层铺筑方式,先根据用户输入的最大斜层并仓面积判断哪几个坝段可以并仓,并仓条件与平层铺筑方式相同,满足条件的坝段按从左岸至右岸的顺序依次并仓,得出几个合并好的仓位,复核当前入仓机械强度是否满足斜层层面最小铺筑强度的要求,若不满足则按机械强度计算最大斜层并仓面积重新进行并仓。所有合并好的仓位按高程最低、等待时间最长者优先原则进行仓位优选,先判断选中仓位是否满足拆模约束,若相邻坝段模板已拆除完成,则判断选中仓位是否满足高差、间歇时间、特殊停工、完工等约束条件,若各项约束条件均满足要求,则根据生产强度、运输入仓强度、碾压强度计算机械实际浇筑强度,机械实际浇筑强度取三者中的最小值,然后浇筑选中仓位,推进其子时钟,更新高程、方量、浇筑起止时间等系统参数,否则任一约束条件不满足要求则选中仓位各坝段子时钟推进一个时间步长,坝段其余参数均保持不变,再循环扫描所有坝段,寻找子时钟最小坝段放进可选仓位集,直至所有坝段全部模拟完毕。

一般情况下浇筑强度受机械入仓运输强度控制,但坝体上部工作面变小后,浇筑强度可能受碾压强度控制,因此计算机仿真过程中应计算碾压强度。碾压强度可根据填筑方向(坝体施工可按

逆水流方向填筑,亦可按垂直坝轴线方向填筑)、摊铺条带宽度、碾压机械行驶速度、碾压遍数、摊铺碾压及质检一个循环的分区宽度、施工铺筑层厚等参数计算。

利用计算机模拟时,平层铺筑最大允许仓面面积  $S_p$  可根据当月混凝土初凝时间、机械实际浇筑强度、碾压层厚计算得出,斜层铺筑由于斜坡坡面面积小,在初凝时间内覆盖下一层混凝土所需的入仓强度通常很小,理论上斜层施工仓面面积可无限大,即不分仓从左岸至右岸通仓浇筑,但通仓浇筑或斜层仓面面积过大时,会导致一个仓的连续浇筑时间太长,经仿真计算,斜层仓面  $4.7 \times 10^4 \text{ m}^2$  时一个仓的连续浇筑时间超过 8 d,施工管理风险较大,且导致整个层面的施工时间过长,不如分仓施工效率高。仿真计算时先由用户输入平斜层分区,系统进行优选计算后反馈修改,平斜层优选计算先由用户输入斜层施工的最大控制仓面面积  $S_x$ ,若  $S_x \leq S_p$  时,直接选用平层,但通常  $S_x > S_p$ ,此时需通过优选计算来选择用平层还是斜层铺筑,通常选总时间短的方式。

## 3 大坝施工过程模拟

### 3.1 生产运输参数

考虑坝址区地形条件、枢纽布置、施工强度、施工布置规划等因素,工程在坝址处初步布置左岸低线、左岸高线、右岸低线和右岸高线 4 套混凝土生产系统,各系统均配置 3 台拌和楼,单台拌和楼额定生产率为  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ ,左右岸系统可同时生产,考虑设备效率的发挥,仿真中碾压混凝土实际最大生产能力初拟为  $1400 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

碾压混凝土坝运输设备主要以自卸汽车、负压溜槽、高速皮带机和塔带机等为主,缆机和门机为辅,工程实践证明,自卸汽车直接入仓是最快速有效的施工方式,因此总体上尽可能选择自卸汽车直接入仓。大坝 512.0 m 高程以下具备条件可利用石渣逐步回填基坑支线路抬升至浇筑高程,为满足 32 t 自卸汽车入仓及混凝土连续浇筑的强度要求,石渣回填道路按双幅路布置,每幅路路面宽 8 m。512.0 m 高程以上支线路垫渣高程已达到极限,河床将无入仓道路,且 512.0 m 高程以上坝体孔洞较多,因此该区域改为塔带机入仓,对于两岸岸边塔带机无法覆盖的坝段则采用满管溜槽入仓,工程大坝体型及入仓设备布置见图 2。结合温控要求,碾压混凝土基础约束区浇筑层厚为 1.5 m,其余浇筑层厚为 3.0 m,局部位

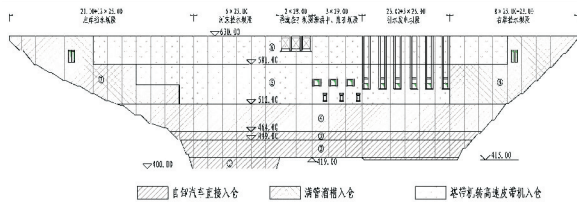


图 2 大坝混凝土入仓方式图

Fig. 2 Mode diagram of dam concrete approach

置根据结构适当调整为 2.0 m。

512.0 m 高程以下,考虑生产系统规模及坝面施工需要,采用 32 t 自卸汽车运输,供料最大上坝强度取 1 400 m<sup>3</sup>/h,经计算对应的单幅路单向行车密度为 54 辆/h,满足场内 II 级路行车密度不宜超过 85 辆/h(单向)的使用要求。

512.0 m 高程以上中间部位采用 TC2400 型塔带机转皮带机浇筑混凝土,TC2400 型塔带机最大起重工作半径为 80 m,单台 TC2400 型塔带机理论生产率为 350 m<sup>3</sup>/h,根据施工经验仿真中实际生产率取为 250 m<sup>3</sup>/h,1 个仓面最多允许 2 台塔带机同时入仓。

工程满管溜槽溜管直径为 800 mm,倾角 45°,左右岸各布置 2 条,利用满管溜槽+仓面自卸汽车转运入仓,经计算,单条满管溜槽最大上坝强度取 250 m<sup>3</sup>/h。

### 3.2 其他主要工艺参数

仿真模拟过程中其他主要工艺参数见表 1,拌和系统每生产 20×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 混凝土检修保养 3 d,摊铺条带宽度为 14~20 m,摊铺、碾压、质检一个循环宽度 30~45 m,碾压机械行驶速度 1.5 km/h,碾压遍数为 12 遍。

表 1 其他主要工艺参数

Tab. 1 Other main process parameters

序号	项目参数	参数指标
1	夏季混凝土初凝时间/h	4.0~4.5
2	其他季节混凝土初凝时间/h	4.5~5.0
3	平均每月有效工作天数/d	25
4	平均每天有效工作时间/h	20
5	允许升程间歇最短时间/d	5
6	允许升程间歇最长时间/d	15
7	高差限制/m	12.0
8	仓面准备、拆模时间/d	5
9	引泄水建筑物孔洞施工等待时间/d	30~70
10	碾压混凝土薄层铺筑层厚/m	0.3
11	斜层施工坡比	1:15

### 3.3 平层工艺方案模拟成果

经模拟,纯平层工艺方案大坝浇筑总工期为 39 个月,共 840 个仓,该方案混凝土浇筑强度见图 3,大坝中下部浇筑强度大,中上部强度相对较小,大坝混凝土开工后第 2、3 年浇筑量占总量的

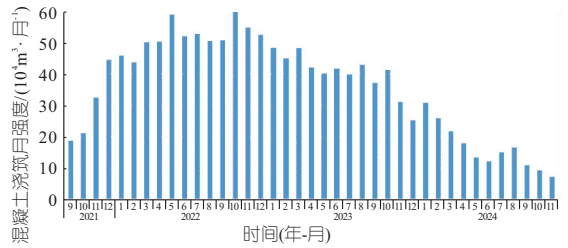


图 3 平层方案混凝土浇筑强度直方图

Fig. 3 Histogram of concrete pouring strength of flat layer scheme

75%。最高峰强度发生在开浇后第 2 年 10 月,达 60×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,高峰时段即大坝浇筑的第 2 年秋冬季,高峰时段平均强度达 55.6×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,对应的坝体高程为 464.0~485.0 m,为 32 t 自卸汽车入仓,此时# 12~# 33 坝段均已开始浇筑,大坝场面开阔,共分 8 个仓跳仓施工,最大入仓强度 1 350 m<sup>3</sup>/h,最大仓面面积 17 200 m<sup>2</sup>,各坝段月上升高度平均 6.0 m,只要拌合系统和运输道路(包括入仓口)能满足既定方案的要求,这样的强度是可行的。

经模拟,古贤工程平层铺筑法常温季节最大仓面宜控制在 1.8×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup> 以内,自卸汽车入仓一般需分 8 个仓,2~4 个坝段合并为一个浇筑仓,最高入仓强度为 1 400 m<sup>3</sup>/h;夏季施工(6~8 月)最大仓面宜控制在 1.4×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup> 以内,从 449.0 m 高程起开始分 10 个仓,1~3 个坝段合并为一个浇筑仓,最高入仓强度为 1 050 m<sup>3</sup>/h。常温季节若最大仓面控制为 2×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,则设计最高入仓强度为 1 500 m<sup>3</sup>/h,冬季最冷季节过后,即 3 月份 443.0 m 高程以后就可以分为 7 个仓施工,仅 1 个仓的差别,导致月浇筑高峰强度从 60×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 上升至 77.5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,强度指标高且强度曲线极不均衡,故本阶段推荐常温季节最大仓面控制在 1.8×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup> 以内。高温季节施工若最大仓面控制在 1.2×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup> 以内,则设计最高入仓强度为 900 m<sup>3</sup>/h,需从 446.0 m 高程起由原来的 8 个仓拆分成 10 个仓,浇筑块普遍等待时间长,1/3 的浇筑块等待时间为 1 个月,故夏季应该加大制冷设备容量,将最大仓面控制在 1.4×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>。

### 3.4 斜层工艺方案模拟成果

纯斜层工艺方案 419.0 m 高程以下每个升程沿坝轴线方向分 1 仓(即从左岸至右岸通仓浇筑),509.0 m 高程以下坝体沿坝轴线方向共分 3 仓,采用自卸汽车直接入仓,碾压方向为顺水方向从下游向上游推进,509.0 m 高程以上共分 2 仓,采用两岸自卸汽车配溜槽入仓,碾压方向沿坝轴线方向。经模拟,最终坝体浇筑施工总工期为

45 个月,共 208 个仓,该方案混凝土浇筑强度见图 4,平均强度为  $37.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$ ,最大月混凝土浇筑强度发生在大坝混凝土开工后第 2 年 9 月,为  $62.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$ ,填筑区域为孔洞高程以下的坝体中下部,对应高程为 455.0~464.0 m,最大仓面面积  $4.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

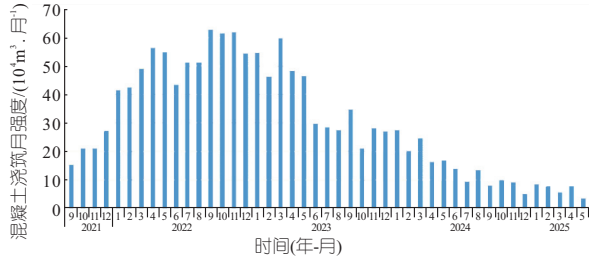


图 4 斜层方案混凝土浇筑强度直方图

Fig. 4 Histogram of concrete pouring strength of inclined layer scheme

经模拟,斜层碾压的最长允许历时和层间间隔时间一般未超过 2.5 h,斜层碾压优势明显,近年来碾压混凝土施工常采用斜层平推法,往往几个甚至数十个坝段连成一个大仓面通仓浇筑,碾压层厚实际已突破 30 cm。斜层碾压存在的问题主要是斜面碾压的坡脚需处理,仓面污染及切缝偏差等。

### 3.5 平斜层结合工艺方案模拟结果

平斜层结合主要是底部和上部采用平层,中部采用斜层。经模拟,碾压混凝土坝施工总工期为 36 个月,平均强度为  $37.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$ ,最大月混凝土浇筑强度为  $63.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$ ,该方案混凝土浇筑强度见图 5。共 256 个仓,其中平层浇筑为 116 仓,斜层浇筑为 140 仓,最大仓面面积为  $4.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,对应仓位高程为 473.0~476.0 m,由 #11~#19 坝段组成,为自卸汽车直接入仓,仓面坝轴线方向长 216.6 m,顺水流方向长 217.0 m,单仓浇筑方量  $14.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。平斜层铺筑方式的选择在碾压混凝土坝施工中极其重要,平斜层结合方案常在坝体中部采用斜层工艺,经过不断模拟和试算,发现其控制准则为平斜层结合方

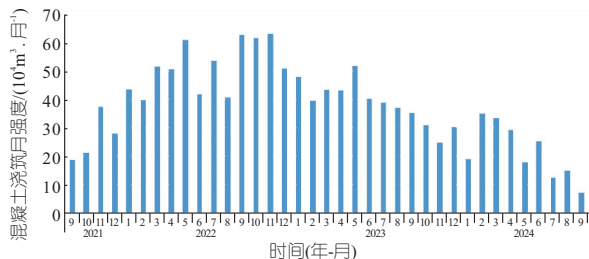


图 5 平斜层结合方案混凝土浇筑强度直方图

Fig. 5 Histogram of concrete pouring strength of flat inclined layer combined scheme

案在仓面超过  $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$  (自卸汽车运输时)、仓面超过  $0.32 \times 10^4 \text{ m}^2$  (塔带机或溜槽浇筑时)或 1.5 m 层厚浇筑天数超过 1 d 及 3 m 层厚浇筑天数超过 2 d 或受降雨影响时宜采用斜层法施工,其他情况采用平层法施工。

### 3.6 不同工艺方案比较

古贤碾压混凝土重力坝坝段多、坝轴线长,碾压混凝土浇筑量巨大,其中坝体中下部混凝土量大,坝面面积大,中上部混凝土量随高程增高逐步减小,坝面面积亦逐步减小。平斜层混合铺筑方案工期为 36 个月,工期最短;斜层铺筑方案工期为 45 个月,工期最长;平层铺筑方案为 39 个月,工期适中。斜层工艺方案及平斜层结合工艺方案生产运输供料强度极少超过  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,平层铺筑方案 419.0~449.0 m 高程 #13~#32 坝段施工期间生产运输供料强度长期超过  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,达到  $1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,且纯平层铺筑方式并仓结构非常复杂,水平运输和垂直运输设备种类多,模板数量大,故平层铺筑工期为 39 个月并不占优势,纯斜层工艺方案工期太长,里程碑节点保证率低。本工程平斜层方案工期最短,拌合系统、运输入仓设备、碾压设备、道路布置等与场地条件相适应,故平斜层结合工艺方案最适合古贤碾压混凝土重力坝浇筑施工。根据仿真模拟,古贤工程在坝址下游布置 4 套混凝土拌和系统是合适的,工程月高峰浇筑强度  $63 \times 10^4 \text{ m}^3$  (远超国内已建工程最大指标  $32 \times 10^4 \text{ m}^3$ ) 是可行的,生产运输设备的布置满足了坝体并仓、跳仓浇筑,需同时对道路设计标准进行反馈。

## 4 结论

基于仿真技术针对古贤工程高碾压混凝土重力坝进行了平层、斜层、平斜层结合工艺方案坝体浇筑过程模拟研究,最终推荐出适宜该工程的平斜层结合工艺方案,该方案总工期最短资源配置适中,为古贤工程详细施工方案的制定提供了支撑依据,其仿真模型模拟机制可为类似工程提供参考。

### 参考文献:

[1] 周宜红,赵春菊,刘全,等. 碾压混凝土坝施工仿真中的智能并仓模型[J]. 水电能源科学,2005,23(5): 47-50.  
 [2] 董京艳,齐央央,黄细丁. 混凝土坝施工过程仿真可视化系统研究[J]. 人民长江,2015,46(15):30-34.

