

潍坊抽水蓄能电站上水库大坝施工仿真研究

许双全¹, 李希稷¹, 胡亦宁²

(1. 山东潍坊抽水蓄能有限公司, 山东 潍坊 261000; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350)

【摘要】 潍坊抽水蓄能电站上水库堆石坝为沥青混凝土面板堆石坝, 坝体开挖填筑工程量大, 且全部利用库盆开挖料筑坝, 开挖、填筑高差大, 作业面有限, 强度高, 需研究开挖填筑程序及施工道路布置的合理性, 确保在合理工期内完成上大坝开挖填筑施工。因此, 在已有堆石坝施工仿真模型研究的基础上, 综合考虑上坝道路布置、坝面作业施工组织、机械资源配置、坝体填筑高差、弃渣场布置与沥青摊铺施工等复杂约束条件, 构建全过程的潍坊抽水蓄能电站上水库大坝施工过程仿真模型, 实现施工过程仿真分析, 为上库库盆开挖与填筑施工提供参考。

【关键词】 大坝施工仿真; 填筑施工; 全过程仿真

【中图分类号】 TV697

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-6159(2026)-09-0004-05

Construction Simulation Study on the Upper Reservoir Dam of Pumped Storage Power Station in Weifang

XU Shuangquan¹, LI Xiji¹, HU Yining²

(1. Shandong Weifang Pumped Storage Co., Ltd., Weifang, Shandong 261000, China;

2. National Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The rockfill dam with asphalt concrete face for the upper reservoir of Weifang Pumped Storage Power Station features large quantities of dam excavation and filling works. All filling materials are sourced from reservoir basin excavation spoils, with a large elevation difference between excavation and filling areas, limited working surface and intensive construction intensity. It is necessary to verify the rationality of excavation-filling procedures and construction road layout to ensure the completion of dam excavation and filling within the scheduled construction period. Based on existing research on construction simulation models for rockfill dams, this study establishes a full-process construction simulation model for the upper reservoir dam of the Station. The model comprehensively considers multiple constraints including access road layout, dam surface construction organization, mechanical equipment allocation, elevation difference of dam filling, spoil yard arrangement and asphalt paving construction, and realizes the simulation analysis of the whole construction process, offer a reference for similar construction projects.

Key words: Dam construction simulation; Filling construction; Full-process simulation

潍坊抽水蓄能电站上水库堆石坝为沥青混凝土面板堆石坝, 坝体开挖填筑工程量大, 且全部利用库盆开挖料筑坝, 上坝料开挖主要分布在库盆的东北部, 利用开挖料直接填筑坝体, 开挖填筑作业面有限、强度高, 需研究开挖填筑程序及施工道路布置的合理性, 确保在合理工期内完成上大坝开挖填筑施工。

堆石坝施工强度高, 工程量大, 且不确定因素众多, 是一个有多个随机因素的复杂系统, 传

统的数学模型以及人工编制方案的方法无法准确、全面、定量分析实际施工过程, 因此, 计算机仿真技术逐步运用于堆石坝施工过程。

1 工程概况

潍坊抽水蓄能电站位于山东省潍坊市临朐县境内, 为大(1)型一等工程, 上水库位于大峪沟

收稿日期: 2026-04-27

作者简介: 许双全(1981—), 男, 高级工程师

沟首处,左岸冲沟发育,地形陡峭,右岸山体雄厚,上水库拦沟筑坝形成,主要包括沥青混凝土面板堆石坝、库盆防渗及边坡工程等。面板堆石坝坝顶高程 630.60 m,坝顶宽 10 m,长 747.58 m,最大坝高 151.4 m。上游坝坡坡比 1:1.75、下游坝坡坡比 1:1.5。坝体采用沥青混凝土面板防渗,面板厚 20 cm。坝体填筑料分区自上游至下游分为垫层料区(2A)、过渡料区(3A)、上游堆石区(3B)、下游堆石区(3C)、干砌石护坡。上游堆石区(3B)中,高程 520.00 m 以下设置 3B1 区,下游堆石区(3C)中,高程 520.00 m 以下设置 3C1 区。库

顶环库公路以下开挖坡比 1:1.75,以上开挖坡比 1:0.75。坝顶公路宽 10 m,环库路长 2 206 m。上水库填筑料全部采用库盆开挖石料填筑施工。

上水库主要工程量为:土方明挖 184 万 m^3 ,石方明挖 1 368 万 m^3 ,石方洞挖 0.47 万 m^3 ,土石填筑 1 250 万 m^3 (压实方),过渡料 15.97 万 m^3 ,垫层料 34.69 万 m^3 ,干砌石护坡 9.25 万 m^3 ,常态混凝土(含喷混凝土)5.4 万 m^3 ,沥青混凝土量 7.56 万 m^3 。

工程施工布置如图 1 所示,其中筑坝过程全部利用库盆开挖料,上坝料开挖主要分布在库盆

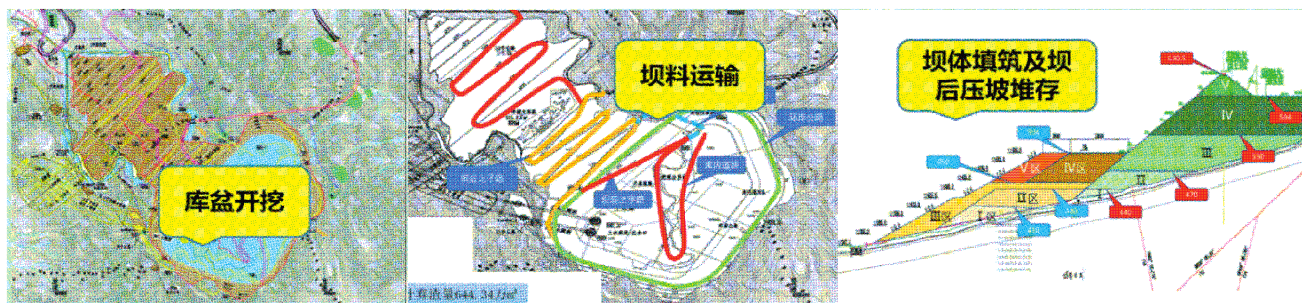


图 1 施工布置图

的东北部,利用开挖料直接填筑坝体,开挖填筑作业面有限,开挖填筑强度高,需研究开挖填筑程序及施工道路布置的合理性,确保在合理工期内完成上大坝开挖填筑施工。因此,如何进行有效地进度计划管理,实现科学的施工组织、合理的资源配置和进度安排;如何实时调整和优化施工方案,做出快速而准确的施工决策,对堆石坝施工进度管理与控制具有重要的指导作用。

2 上水库大坝施工仿真原理与建模方法

潍坊抽水蓄能电站上水库大坝施工过程主要由三个子系统组成,分别为坝料开采子系统,运输子系统和填筑子系统。其中,坝料开采子系统负责上坝土石料的生产供应,潍坊抽水蓄能电站上水库大坝土石料主要来自库盆开挖石料,此子系统主要是在库盆自上而下且分区分层开挖土石料。运输子系统负责土石料的上坝运输,主要过程为装、运、卸,使用大型装载机(或挖土机)配自卸汽车。填筑子系统负责坝面土石料的铺填过程,主要过程包括铺土、平土洒水、压实、质检刨毛等,整个铺填过程分区、分层、分段进行,子系统之间相互联系且相互制约。

该研究采用离散事件仿真(DES)方法对坝料开采、上坝运输、大坝填筑进行全过程模拟,并引入改进循环网络模型(CYCLONE)对仿真过程建模。循环网络技术是将排队理论与计算机模拟技术相结合运用于循环系统中,通过计算机对随机时间以及循环过程进行模拟。

在建立模型时须遵循如下原则:所有服务台节点必须以一个排队节点作为紧前节点,所有排队节点必须以一个服务台节点作为紧后节点;若料场装运机械配置有几种不同类型时,则将该料场分解为不同装料系统并分别对应相应的装运机械;若装料场机械设备类型相同,即使对应不同的卸料场,也可不对系统进行分解,而只将其考虑为综合节点;对中转料场既是装料点又是卸料点的情况,同样将其看成综合节点,程序可根据所在回路属性判断是装料服务还是卸料服务;回路必须是闭合的,且包含运输车辆所经过所有节点。

该研究用一个离散事件动态系统网络模型来描述潍坊上水库大坝施工过程,如图 2 所示。图中节点表示上坝运输车辆运行过程中的滞留活动,箭线表示车辆的流动方向和各滞留活动

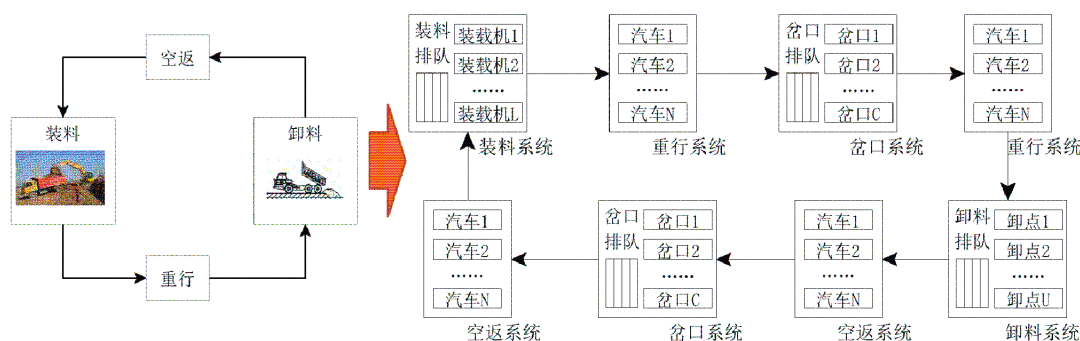


图2 土石坝施工动态系统网络模型

发生的次序。模型共包含两类服务机构:一类是没有服务台的服务机构,如道路系统;一类是有服务台的服务机构,如岔口系统、装料系统、卸料系统。为了描述各子系统的不同属性,将排队网络模型中的节点划分为四种类型,即道路节点、服务台节点、排队节点以及既有装料又有卸料或同为装料或卸料的综合服务台。四种类型的节点构成了潍坊上水库大坝施工仿真的循环网络模型。

3 上水库大坝施工模型建立

3.1 坝体填筑方案

构建仿真模型前先确定坝体填筑方案,潍坊上水库堆石坝及库底石方填筑总量 1 370.3 万 m^3 ,其中垫层料 34.69 万 m^3 利用下水库砂石加工系统加工,堆石料 1 326.1 万 m^3 和干砌石护坡 9.25 万 m^3 利用库盆开挖料填筑。

3.2 仿真模型建立

仿真模型建立主要包括坝体模型和开挖-上坝-填筑回路模型建立过程。首先根据大坝剖面图在 Rhino 中创建大坝初始模型,与所建立的开挖面模型交合后生成大坝实际坝体模型;再依据坝体的分期分区关系,对坝体模型进行切割处理,得到所有坝体分期分区模型,对分期分区模型以 0.1 m 的间隔进行切割,得到每一分期分区模型的间隔为 0.1 m 的体积量,在数据库中生成仿真计算需要的各碾压层体积数据。

开挖-上坝-填筑回路模型依据土石方调配规划、上坝运输道路规划及坝体填筑方案建立,

回路模型如图 3 所示。首先建立各个分期各料场至坝区的运输线路模型,并添加每条运输线路的完整施工信息作为仿真计算的基础,共整理得到 26 条回路。

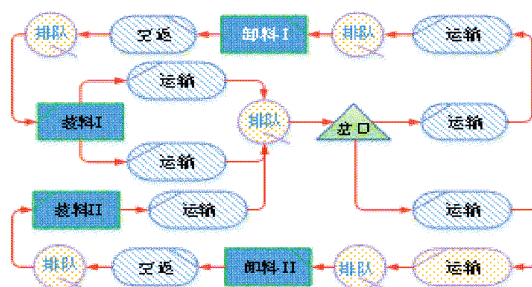


图3 回路模型

3.3 仿真参数输入

仿真参数对仿真结果的准确性有着决定性作用,因此在构建仿真模型后需要根据坝体填筑方案和模型特征输入符合实际情况的仿真参数。

根据施工方案设计和实际设备调用,将不同类型的运输机械配套参数存入软件的施工信息数据库中,方便在仿真计算中选取各个坝区对应的机械配套参数。同样,根据施工方案设计和实际设备调用,将不同类型碾压设备的施工参数也存储在数据库中以备调用。

此外,根据施工方案设定回路模型信息,主要包括回路的开始时间、回路承载的运量、回路所对应的机械配套组合以及机械数量设定等。同时,坝体施工中的土料开采、填筑受到降雨与气温等自然条件影响和制约较大。根据招标文件提供的水文气象资料综合分析,设定坝体不同材料的各月停工天数,按照坝体填筑部位不同,各月

表1 月有效施工天数

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	总
施工天数/d	27	20	29	30	27	28	29	31	30	30	30	30	341

有效施工天数见表 1。

4 潍坊上水库大坝施工仿真成果

首先可以得到抽蓄上水库大坝施工工期和填筑强度,见表 2。由表 2 知大坝填筑施工时段为

2022 年 1 月—2025 年 8 月,加上坝后压坡体堆存(2021 年 9 月—2022 年 1 月),仿真结果总工期为 48 个月。填筑强度峰值为 45.48 万 m³/月,发生在坝体填筑的第 36 个月,位于第 5 期。从整体角度看,第 4、5 期填筑强度较高,且施工强度较

表 2 工期、强度仿真结果

施工分期	堆石填筑量/ 万 m³	坝后压坡堆存量/ 万 m³	强度/万 m³		不均衡施工系数	施工时段
			月最大	月平均		
1 期	4.7	72.49	18.73	15.43	1.21	2022 年 1 月—2022 年 1 月
2 期	61.1	36.25	23.58	19.47	1.21	2022 年 2 月—2023 年 6 月
3 期	295.8	52.48	44.77	36.22	1.24	2023 年 7 月—2024 年 4 月
4 期	343.1	41.02	41.75	38.41	1.09	2024 年 5 月—2024 年 2 月
5 期	429.7	24.44	45.48	41.29	1.10	2024 年 3 月—2025 年 1 月
6 期	235.7	22.44	41.31	36.87	1.12	2025 年 2 月—2025 年 8 月

为均衡。

此外,对料场的供料强度进行了分析,库盆土石开挖总量 1 914.53 万 m³(填筑方)。库盆一区为主要料场,开挖总量 1 821.83 万 m³,有用料 1 297 万 m³,弃料 524.83 万 m³。该模型同时考虑有用料上坝和弃料出渣,平均月供料强度为 35.72 万 m³/月,最大月供料强度为 59.71 万 m³/月,

发生在第 39 月,位于第 4 期。库盆二区开挖总量 92.7 万 m³,其中有用料开挖 19.3 万 m³,无用料 73.4 万 m³。弃料主要用于填筑 500 m 平台,需要在第一期完成填筑。总体开挖时间共 18 个月。以 660~670 m 高程为例分析料场开采强度满足上坝强度的概率,见表 3。由表 3 可知开挖强度基本满足上坝强度,不制约大坝填筑进度。

表 3 石料场供料强度仿真结果

开挖块编号	高程/m	爆破日期	完工概率/%	开挖块编号	高程/m	爆破日期	完工概率/%
1	660~670	2023 年 5 月 1 日	100	13	660~670	2020 年 6 月 3 日	100
2	660~670	2023 年 5 月 6 日	100	14	660~670	2020 年 6 月 6 日	99.96
3	660~670	2023 年 5 月 9 日	99.96	15	660~670	2020 年 6 月 8 日	100
4	660~670	2023 年 5 月 11 日	100	16	660~670	2020 年 6 月 11 日	99.98
5	660~670	2023 年 5 月 14 日	99.92	17	660~670	2020 年 6 月 13 日	100
6	660~670	2023 年 5 月 16 日	100	18	660~670	2020 年 6 月 16 日	99.92
7	660~670	2023 年 5 月 19 日	99.98	19	660~670	2020 年 6 月 18 日	100
8	660~670	2023 年 5 月 21 日	100	20	660~670	2020 年 6 月 21 日	99.84
9	660~670	2023 年 5 月 24 日	99.98	21	660~670	2020 年 6 月 23 日	100
10	660~670	2023 年 5 月 26 日	100	22	660~670	2020 年 6 月 26 日	99.94

通过仿真计算也可得到各运输路线机械设备配置情况及利用率,以及各供料源装载设备数量、型号、利用率,各受料源碾压设备数量、型号、利用率,仿真结果如图 4 所示。

对潍坊上水库大坝场内道路年运量进行统计,得出各路段在各分期内的最大月运料强度和年运输量,以及施工全过程中道路最大年运量,统计结果见表 4。由表 4 可知,工程中所有道路中最大年运量出现在库内临时 1 道路靠近库盆区段和库内临时 4,分别为 1 153.69 万 t 和 1

115.57 万 t,出现在第 3、4 期。总的来说,潍坊上水库大坝工程所有上坝道路大于 250 万 t 小于

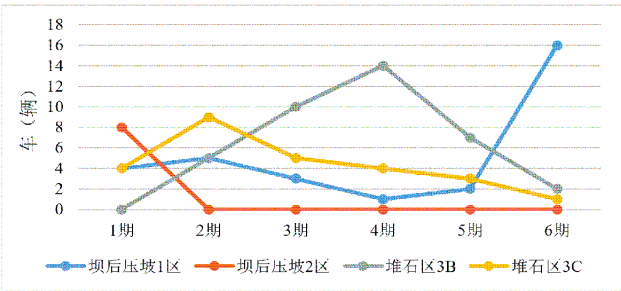


图 4 各分期分区运输机械设备配置

表 4 各路段年运量统计

路段编号	道路名称	道路等级	道路最大年运输量/万 t	道路最大月运输量/万 t
2011	库内临时 1-1	二级	1 153.69	110.76
2012	库内临时 1-2	二级	432.04	52.22
2013	库内临时 1-3	二级	363.73	52.22
2014	库内临时 1-4	二级	191.61	50.57
2015	库内临时 1-5	二级	95.19	28.09
2020	库内临时 2	二级	123.3	25.78
2030	库内临时 3	二级	123.3	25.78
2031	L3 号公路	二级	218.5	25.78
2040	库内临时 4	二级	1 115.57	102.43
2070	进出水口支线	三级	54.3	13.02
2080	坝上路	三级	167.36	19.8
2411	库内临时 5	二级	1 047.07	94.79
2450	库底交通洞	二级	382.06	40.72
2486	坝后之字路	二级	382.06	40.72
2487	坝前之字路	二级	1 047.07	94.79

1 200 万 t 的年运量道路有库内临时 1、库内临时 4、库内临时 5、库底交通洞、坝后之字路和坝前之字路, 这些道路等级建议选为水电二级道路, 其他道路选为水电三级道路, 可以满足道路年运量

要求。

5 结 语

堆石坝施工仿真是指导现场施工管理的有效工具, 但主要侧重于对仿真模型的建立、仿真参数的确定等方面进行研究, 多围绕运输系统及填筑系统开展。潍坊抽水蓄能电站工程上水库由库盆开挖形成, 开挖、填筑高差大, 需研究开挖填筑程序及施工道路布置的合理性, 确保在合理工期内完成上大坝开挖填筑施工。因此, 该研究在已有堆石坝施工仿真模型研究的基础上, 综合考虑上坝道路布置、坝面作业施工组织、机械资源配置、坝体填筑高差弃渣场布置与沥青摊铺施工等复杂约束条件, 构建全过程的潍坊抽水蓄能电站上水库大坝施工过程仿真模型, 通过仿真分析得到开挖强度、上坝道路行车密度、上坝强度、机械设备利用率、坝后堆存量及工期计划等仿真成果, 为施工组织设计方案合理性论证提供技术支持, 为上库库盆开挖与填筑施工提供参考。

(责任编辑 赵其芬)

(上接第 3 页)

在选取栏杆型式时, 考虑到混凝土预制桩的冠梁部分已浇筑完成, 该工程最终选用不锈钢栏杆进行安装。栏杆位于预制桩冠梁的中线位置, 高 1.15 m, 立柱间距 2 m, 根据设计图纸定位钻孔。为了确保栏杆始终处于良好的使用状态并保持其外观质量, 后期需定期对其进行维护。

4 结 语

波浪形预制桩护岸凭借独特优势与工程实践验证, 充分满足了现代工程对高效、环保与美观的多重需求。在城市河道工程中, 预制桩的长度选取与结构计算需紧密结合具体工程条件, 以确保岸坡稳固; 在进行预制桩设计时, 必须详细勘察地下管线及既有建筑物的情况, 保证良好衔接; 针对复杂的地形需制定详细的应对方案, 比如打桩过程中若遇到土体液化问题, 可通过土体

注浆及加固预制桩齿墙等方法解决; 同时, 要考虑施工的可行性, 优化桩体设计, 并提前做好安全设计。

参考文献

- [1] 信亮. 预应力钢筋混凝土波浪桩护岸在城区河道治理中的应用[J]. 东北水利水电, 2022, 40(7): 51-53.
- [2] 王静. 预应力混凝土波浪桩在内河航道工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(7): 75-76.
- [3] 逢雅萍, 荆大荣. 预制混凝土波浪桩在分洪河道治理工程中的应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(7): 114-116.
- [4] 黄树亮. 波浪桩施工技术在中小河流综合治理工程 PPP 项目中的应用[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 168-170.
- [5] 杨金龙. 预制装配式波浪桩生态护岸研究 [J]. 中国水运, 2022, (4): 29-32.
- [6] 胥维纤, 张晓斐, 曹欣峰. 预制波浪桩在河道护岸护脚设计中的应用分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(7): 122-125.
- [7] 李丽, 白玉龙. 河道稳定性计算及水环境治理设计[J]. 水利规划与设计, 2021, (6): 62-67.

(责任编辑 崔春梅)