

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.001

心墙堆石坝仓面施工进度动态控制

钟登华,杜荣祥,关涛,胡炜,王佳俊

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:联合仓面施工进度仿真模型和仓面施工质量实时监控模型,综合考虑施工现场各项影响因素,提出了心墙堆石坝仓面施工进度动态控制模型,通过对仓面施工方案的优化以及对施工过程的施工进度偏差实时分析和反馈,从而实现仓面施工进度的事前、事中控制。将该施工进度动态控制模型应用到某心墙堆石坝,通过对心墙区某仓面进行多方案优化仿真分析,给出仓面施工事前控制推荐优化方案;当实际施工进度滞后时,仓面施工仿真模型根据当前仓面施工面貌进行动态更新并仿真,给出仓面施工中控制推荐优化方案,从而保障仓面施工进度。应用结果表明,实际施工方案与仿真推荐方案一致,且二者仅相差 23 min,实现了仓面施工进度的有效控制。该反馈模型能够及时给出合理的优化施工方案,从而实现对现场施工进度偏差的有效控制,为心墙堆石坝填筑进度提供保障。

关键词:心墙堆石坝;仓面施工进度;实时监控;仓面施工仿真;参数更新;动态控制;事前控制;事中控制

中图分类号:TV511;TV641.4⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)04-0283-08

Dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface

ZHONG Denghua, DU Rongxiang, GUAN Tao, HU Wei, WANG Jiajun

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A dynamic control model for construction progress of the storehouse surface of core rockfill dams is proposed based on the simulation model for construction progress and the real-time monitoring model for construction quality of the storehouse surface, with field construction factors taken into consideration. Through optimization of the construction scheme and real-time analysis and feedback of progress deviation during the construction process with the model, the construction progress control before and during the construction process was realized. The model was applied to a core rockfill dam under construction. An optimized scheme for advance control of construction progress of a storehouse surface was chosen based on optimization and simulation analysis of multiple construction schemes. When the construction progress was stunted by unforeseen circumstances, the simulation model for storehouse surface construction was used to dynamically simulate and update the construction situation, and an optimized scheme for intermediate control of construction progress was recommended. The schedule of storehouse surface construction can thus be guaranteed. The application results showed that the actual construction scheme was consistent with the chosen one, only with a deviation of 23 minutes in the construction process. Therefore, the storehouse surface construction progress could be effectively controlled with the dynamic control model. As conclusions, the model can provide a reasonable and optimized construction scheme, effectively control the deviation in construction progress, and guarantee the construction progress of a storehouse surface of core rockfill

收稿日期: 2017-01-06
基金项目:国家自然科学基金创新群体基金(51621092);国家自然科学基金(51439005);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB035904)
作者简介:钟登华(1963—),男,江西赣县人,中国工程院院士,教授,博士,主要从事水利水电工程施工仿真与实时控制分析技术研究。
E-mail: dzhong@tju.edu.cn

dams.

Key words: core rockfill dam; storehouse surface construction progress; real-time monitoring; storehouse surface construction simulation; parameter updating; dynamic control; advance control; intermediate control

随着我国水利水电工程建设的进展,心墙堆石坝开始向 300 m 级高度不断发展^[1],心墙堆石坝规模的提高对大坝建设管理特别是施工进度的控制提出了更高的要求。施工进度作为大坝施工过程中重要的控制目标,相关学者进行了大量的科学研究。施工过程仿真以循环网络模拟技术(CYCLONE)^[2]的出现为开端,此后有许多学者基于此提出了诸多仿真模型,如 SIREN、CIPROS、STRABOSCOPE 和 SIMPHONY 等^[3],并在土木建筑和公路建设等领域进行了大量研究^[4-6]。在国内,朱光熙^[7]首次采用系统仿真方法对大坝施工过程进行了仿真研究,并得到较理想且符合实际的施工方案;钟登华等^[8]利用循环网络技术建立仿真模型,采用面向对象的方法开发了堆石坝施工仿真系统;钟登华等^[9]通过分析大坝体型参数,把仓面整合成填筑单元,作为仿真单位进行研究,并以此对心墙堆石坝仓面碾压过程进行了精细化分析;钟登华等^[10]针对沥青混凝土心墙堆石坝的特点建立了心墙堆石坝施工仿真模型,并在某工程中得到了成功应用;钟登华等^[11]基于 CATIA 开发平台,实现了堆石坝施工仿真过程的三维动态表达和 4D 模型的远程交互。

随着信息技术和网络技术的发展,施工管理方法越来越向科学化、数字化发展。针对土石坝和碾压混凝土坝坝面施工的特点,天津大学研发出相应的大坝施工质量实时监控系统^[12-13],应用该系统可对大坝碾压施工仓面中碾压机速度、振动状态、仓面碾压遍数、压实厚度等施工参数进行实时监控,从而保证仓面碾压施工质量,同时对仓面施工进度进行了实时掌控。随着实时监控技术的发展,实时监控技术与施工仿真技术得到了有效结合,并得到了快速发展。钟登华等^[14]应用系统仿真技术、数据库技术、可视化技术、系统集成技术和实时监控技术,开展了高堆石坝施工仿真与优化的理论方法与技术研究。刘宁等^[15]通过分析实时监控数据,提出了监控与预测信息对动态仿真系统的影响机制。钟登华等^[16]应用实时监控数据与施工仿真参数对比分析了实际施工进度出现偏差的原因并提出施工建议。张念木^[17]提出了基于实时监控的面板堆石坝施工动态仿真模型,根据实际施工信息,实时获取并更新仿真参数,对施工进度进行动态仿真预测。钟登华等^[18]基于实时监控技术,对碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化进行了研究。

在施工进度控制领域,随着计算机技术的发展,施工仿真技术为施工现场进度控制提供了有力的手段,任炳昱^[19]研究高拱坝混凝土跳仓浇筑施工动态仿真的基本原理对大坝跳仓浇筑进行多方案动态仿真分析与综合评价优选;吴康新^[20]根据进度控制的基本原理,描述了高拱坝施工进度动态调整与控制的方法。然而上述研究是对大坝施工进度的宏观控制,对于仓面内如何进行合理的施工组织规划,以及仓面施工进度出现偏差后应当如何更新施工方案,从而最大限度的保障施工进度,上述研究中均未进行讨论。

综上所述,对于仓面碾压质量实时监控技术与施工仿真技术的结合,仅局限于碾压施工参数的统计分析,但是尚未实现基于实时监控技术和施工仿真技术的施工进度与资源配置的动态反馈。而现有对施工进度仿真的研究中,仅能对施工进度进行预测,但是对于如何优化施工现场资源配置,以及如何对施工现场进行进度跟踪与反馈控制均未涉及。

基于当前研究现状,笔者在现有研究基础上做出如下改进:(a)在仓面填筑施工开始前,施工仿真模型根据仓面体型和现场施工资源配置给出优化的施工进度方案,进行仓面施工进度的“事前控制”;(b)实时监控模型对仓面施工过程进行动态跟踪,当发现仓面施工进度与计划进度出现偏差时,施工仿真模型会根据现场实际情况动态更新仿真初始条件,并给出更新的施工进度方案,实现仓面施工进度的“事中控制”,从而最大限度地保障仓面施工进度。

1 系统框架

通过仓面施工过程精细化监控模型对大坝仓面施工过程进行实时监控,整理并分析各项机械施工参数,作为仓面施工仿真模型的初始输入参数,同时考虑多种施工因素影响把影响因素作为仿真的约束条件,进行施工仿真计算,施工仿真成果指导仓面实际施工过程。通过现场实际进度与仿真进度对比,当发现施工出现进度偏差后,将偏差反馈信息发送至施工仿真模型,并基于最新的仓面施工面貌和施工参数重新进行仿真计算,给出新的施工方案,从而完成施工进度的动态控制。系统框架如图 1 所示。

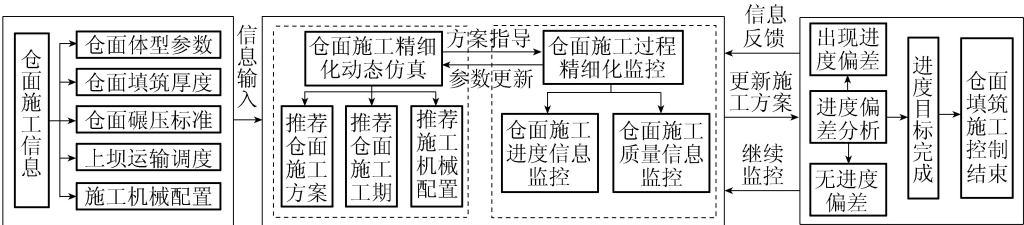


图1 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制框架

Fig.1 Framework of dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface

2 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制数学模型

2.1 目标函数和约束条件

在基于实时监控的心墙堆石坝仓面施工进度动态控制模型中,通过仓面施工仿真模型与实时监控模型间的数据有效沟通,实现仓面施工进度的动态实时控制,在达到仓面施工质量要求的同时,实现仓面施工进度的控制目标。目标函数如下:

$$T = f(S, T_e, C_o) \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} S = g(A, B, m, \rho, V) \\ T_e = h(v_{tr}, l, h, v_r, p, b, e) \\ C_o = k(w, D, G, P) \end{cases} \tag{2}$$

式中: T ——仓面实际施工进度; S ——仓面施工进度计划; T_e ——仓面施工进度控制过程; C_o ——仓面施工进度控制干扰因素; A ——仓面施工进度目标计划制定时要求仓面范围; B ——方案规划碾轮宽度; m ——方案规划施工机械数量; ρ ——方案规划运输道路承载能力; V ——运输车单车运载土方量; v_{tr} ——运输车实际行驶速度; l ——运输车实际行驶路线; h ——仓面实际厚度; v_r ——碾压机实际碾压速度; e ——碾压机实际振动状态; p ——条带实际碾压遍数; b ——碾压条带实际搭接宽度; w ——天气情况; D ——施工干扰; G ——管理水平; P ——施工水平。

基于对上述指标参数分析,约束条件可表示为进度计划制定约束、进度计划执行约束和进度计划执行干扰因素三部分。

a. 进度计划制定约束:

$$\begin{cases} A = A_s & B = B_s & V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ \rho \leq \rho_{\max} & M_{\min} \leq m \leq M_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

式中: A_s ——实际仓面面积约束; B_s ——实际碾轮宽度; $V_{\min}$ ——现场运输车运载能力下限; $V_{\max}$ ——现场运输车运载能力上限; $\rho_{\max}$ ——现场运输道路的最大承载能力; $M_{\min}$ ——现场施工机械数量下限; $M_{\max}$ ——现场施工机械数量上限。

b. 进度计划执行约束:

$$\begin{cases} v_{tr} \leq v_{tr\max} & l = [l_c] & h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ v_{r\min} \leq v_r \leq v_{r\max} & e = e_s \\ b_{\min} \leq b \leq b_{\max} & p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $v_{tr\max}$ ——规范要求运输车最大行驶速度; l_c ——现场可行运输车行驶路线; $h_{\min}$ ——规范要求仓面最小厚度; $h_{\max}$ ——规范要求仓面最大厚度; $v_{r\min}$ ——规范要求碾压机最小碾压速度; $v_{r\max}$ ——规范要求碾压机最大碾压速度; e_s ——规范要求碾压机振动状态; $b_{\min}$ ——规范要求条带最小搭接宽度; $b_{\max}$ ——规范要求条带最大搭接宽度; $p_{\min}$ ——条带最少碾压遍数; $p_{\max}$ ——条带最多碾压遍数。

c. 进度计划执行干扰因素:

$$\begin{cases} w = w_s & D = [D_s] \\ G = [G_s] & P = [P_s] \end{cases} \tag{5}$$

式中: w_s ——现场实际天气情况; D_s ——现场实际施工干扰; G_s ——现场实际管理水平; P_s ——现场实际施工水平。

实际施工过程中,通过将仓面施工状态与仿真中相应时钟对应的状态进行动态对比,当出现上述状态异常时,系统判断进度偏差出现,并根据现场实际施工面貌进行优化仿真分析。状态转移方程如下:

$$\begin{cases} V_i - \Delta V \leq V_j \leq V_i + \Delta V \\ S_{Si} - \Delta S_s \leq S_{Sj} \leq S_{Si} + \Delta S_s \\ S_{Ri} - \Delta S_R \leq S_{Rj} \leq S_{Ri} + \Delta S_R \\ T_j = f(T_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_i、V_j$ ——仿真中时刻*i*和实际施工中时刻*j*对应的仓面卸料方量; ΔV ——施工方案卸料方量允许误差; $S_{Si}、S_{Sj}$ ——仿真中时刻*i*和实际施工中时刻*j*对应的仓面平仓面积; ΔS_s ——施工方案平仓面积允许误差; $S_{Ri}、S_{Rj}$ ——仿真中时刻*i*和实际施工中时刻*j*对应的仓面压实面积; ΔS_R ——施工方案压实面积允许误差; $T_i、T_j$ ——仿真中到达*i*时刻和实际施工到达*j*时刻时的累积仓面施工历时。

2.2 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制方法和流程

在仓面施工开始前,通过仓面施工过程精细化监控信息对仓面碾压施工数据进行采集,并应用贝叶斯更新方法^[21]对施工参数分布规律进行更新(包括碾压机速度分布规律、碾压机偏转角规律、搭接宽度等),作为仓面施工仿真初始输入参数,结合仓面体型参数、施工机械配置等信息,通过仓面流水单元规划方法对仓面施工方案进行规划,并应用仓面施工仿真模块对仓面进行施工仿真计算,给出推荐的机械配置方案、仓面施工方案以及优化的施工工期^[22];施工管理者以此方案指导现场施工,并通过仓面碾压实时监控模块进行仓面施工过程跟踪。系统对施工过程中发生的进度偏差实时反馈,并更新仿真模型,从而完成仓面碾压施工过程的反馈控制。心墙堆石坝仓面施工进度动态控制流程如图2所示(*n*为施工方案,*z*为仓块,*Z*为仓块总数)。

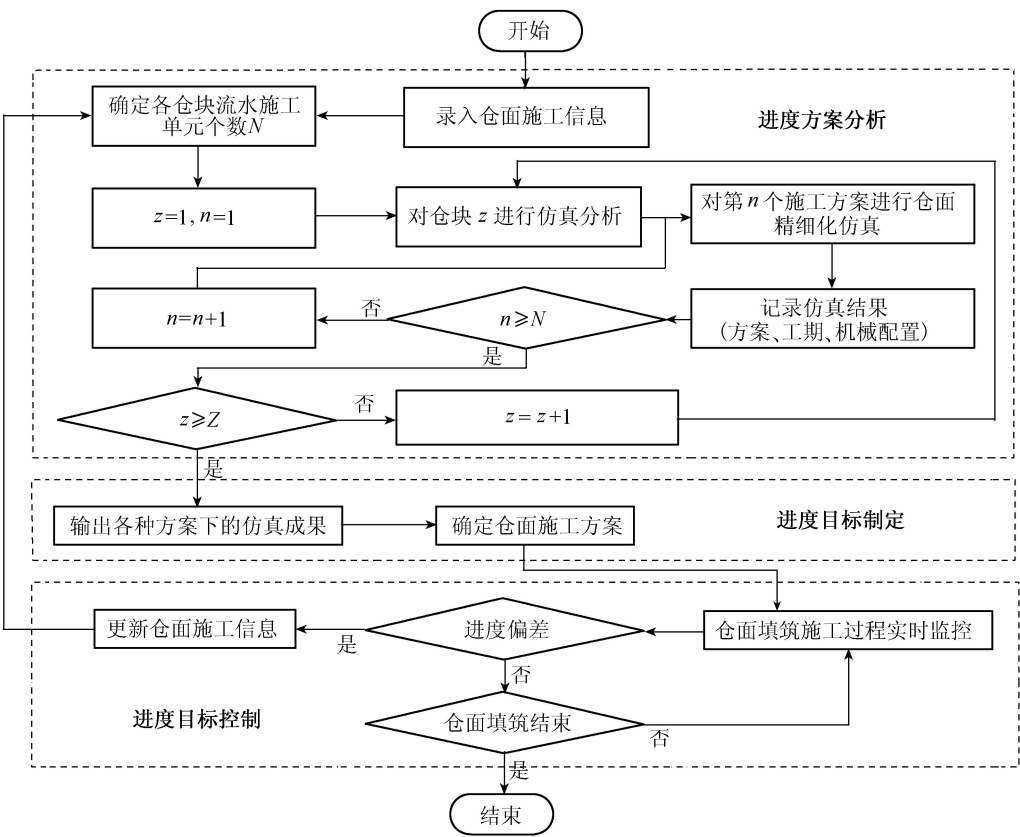


图2 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制流程

Fig.2 Flow chart of dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface

在现场仓面规划阶段,仓面施工进度仿真模型从仓面碾压质量实时监控模型中同步获取包括仓面边界、施工参数、机械投入等仓面规划参数,并进行施工优化仿真计算,通过多方案比较,选择最佳的仓面施工方

案,从而实现对仓面施工过程的第一阶段控制,即“事前控制”。控制过程见图 3(a)。

仓面施工过程中,当出现进度偏差时,仓面施工进度仿真模型会再次获取仓面碾压质量实时监控模型中的仓面施工参数,获取当前仓面施工面貌。基于此重新进行优化仿真计算,并给出当前施工面貌下新的施工推荐方案,从而最大限度地保障施工进度。此为第二阶段控制,即“事中控制”,控制过程见图 3(b)。

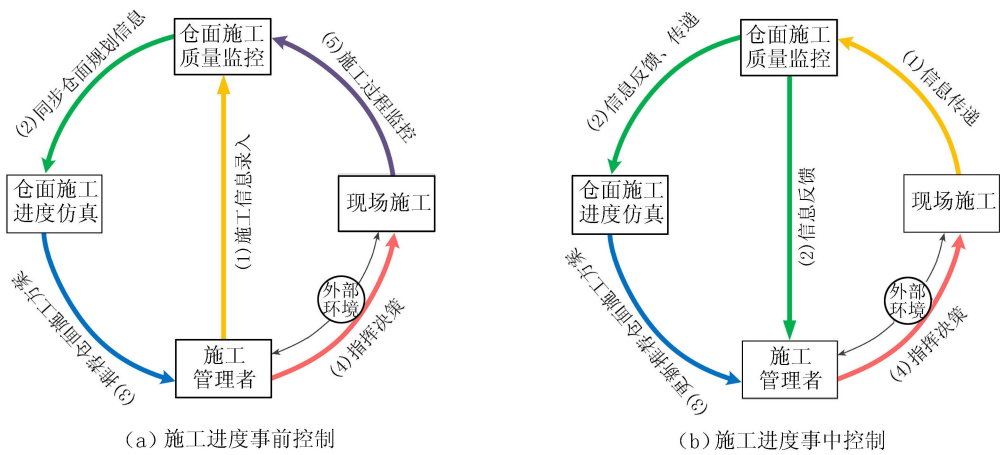


图 3 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制过程

Fig.3 Process of dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface

3 工程实例

以中国西南某大型水利工程为例,坝型为砾石土心墙堆石坝,最大坝高 295 m。应用上述动态控制理论,提出基于实时监控的心墙堆石坝仓面施工进度动态控制理论并对现场施工进度进行动态反馈控制。

3.1 初始条件下优化施工方案与事前控制

以心墙区某施工仓面为例,仓面尺寸为 68.4 m×46.6 m,施工管理者通过录入仓面施工坐标、机械参数等指标,并同步到仓面施工进度仿真模型,确定可行的仓面施工方案;按照流水施工单元划分方法,仓面可划分为 1~5 个流水施工单元,分别对应 5 种施工方案(表 1)。

表 1 事前控制仿真施工方案对比

Table 1 Comparison of construction schemes of advance control

施工单元数/个	工期/h	运输车数量/台	平仓机数量/台	碾压机数量/台	运输车利用率/%	平仓机利用率/%	碾压机利用率/%
1	23.01	11	3	4	42.95	30.58	45.86
2	17.06	11	3	4	56.07	39.92	59.87
3	15.73	11	3	4	62.89	44.78	67.15
4	18.31	8	3	3	74.35	38.50	76.98
5	19.15	8	3	3	71.03	36.78	73.55

仿真过程根据现场实测碾压机速度、偏转角、搭接宽度等参数,以及现场施工资源配置,对仓面施工进行多方案仿真比选。在资源配置允许的情况下,选择工期最短为最优方案。对 5 种方案分别进行施工仿真,得到工期见表 1。仿真结果表明,当仓面施工划分为垂直河流方向 3 个流水施工单元时,工期为 15.73 h,在 5 种可行施工方案中工期最短。当仓面划分为 1~3 个流水单元时,仓面施工机械配置相同,均需要 11 台运输车、3 台平仓机和 4 台碾压机,但由于仓面施工组织不同,各方案工期不同,因此机械利用率也有随工期变短而增加的趋势;当仓面划分为 4~5 个流水施工单元时,机械配置数量有所改变,共需 8 台运输车、3 台平仓机和 3 台碾压机。因此当仓面施工资源有限时,可推荐方案 4(即 4 个流水施工单元方案);当施工资源配置充足时,推荐 3 个流水单元施工方案。

施工仿真模型将优选出的施工方案推荐给施工管理者,此为仓面施工进度仿真根据现场实测施工参数对现场施工的“事前控制”。施工管理者按照施工方案指导现场施工,并对施工过程进行实时监控。

3.2 异常工况下施工优化方案更新与施工事中控制

现场施工仓面于第一年 11 月 28 日 20:04 开仓,23:00 上坝道路由于机械设备损坏导致运输道路拥堵,

上坝强度受到限制,截至11月29日5:55,即距离开仓时间9.85 h后道路恢复正常,故仓面在此时间段内仅有一个工作面进行作业,处于顺序施工状态。按仿真推荐方案,正常工况下仓面应平仓完成,且第二个流水单元进行最后一个条带碾压(图4(a)),而仓面实际仅进行到第二个单元将近1/3面积的碾压施工,仓面实际施工进度已经偏离初始计划(图4(b))。

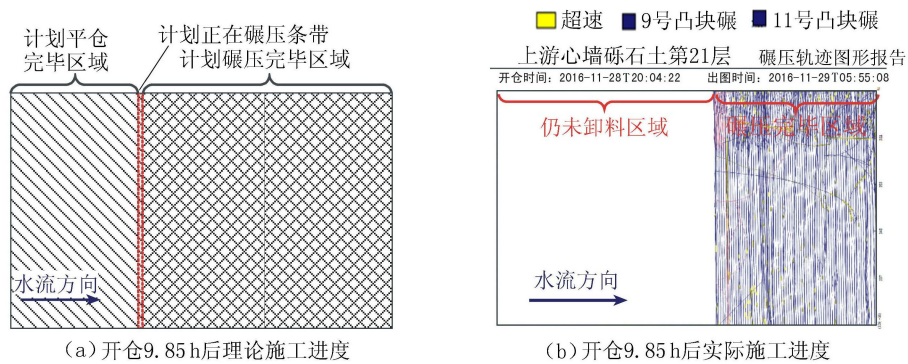


图4 仓面施工进度偏差对比

Fig.4 Comparison of deviation in construction progress of storehouse surface

针对此情况,施工仿真模型根据施工质量实时监控模型动态更新现场仓面信息,得到最新施工面貌,并重新进行仿真优化计算。进行仓面施工进度的“事中控制”。

截至11月29日5:55,仓面按照顺序作业方式,完成下游侧29.3 m区域的碾压施工工作,仓面剩余39.1 m×46.6 m范围还未进行施工,根据仓面尺寸、机械参数等指标确定可行的仓面施工方案为垂河向划分1~3个流水单元,并进行仿真计算,得到工期如表2所示。

表2 事中控制施工方案对比

Table 2 Comparison of construction schemes of intermediate control

施工单元数/个	工期/h	运输车数量/台	平仓机数量/台	碾压机数量/台	运输车利用率/%	平仓机利用率/%	碾压机利用率/%
1	13.16	11	3	4	42.36	31.68	44.83
2	8.36	11	3	4	67.62	48.13	72.21
3	10.43	10	2	3	59.62	57.88	77.18

当仓面划分为1~2个流水单元时,仓面施工机械配置相同,均需要11台运输车、3台平仓机和4台碾压机;当仓面划分为3个流水施工单元时,机械配置数量有所改变,共需10台运输车、2台平仓机和3台碾压机。仿真结果表明,当仓面施工划分为垂直河流方向2个流水施工单元时工期可达8.36 h,为3种可行施工方案中工期最短的方案。在各方案机械配置和机械利用率均在合理范围的情况下,为了满足施工进度需求,现场推荐施工方案2(即垂河向划分2个流水施工单元),如图5(a)所示。此为仓面施工进度仿真根据现场实测施工参数对现场施工的事中控制。

现场按照上述推荐施工仿真方案进行现场施工组织,并于11月29日14:40完成仓面施工过程,如图5(b)所示,施工情况与仿真结果基本吻合,实现了仓面实时施工进度有效反馈控制。

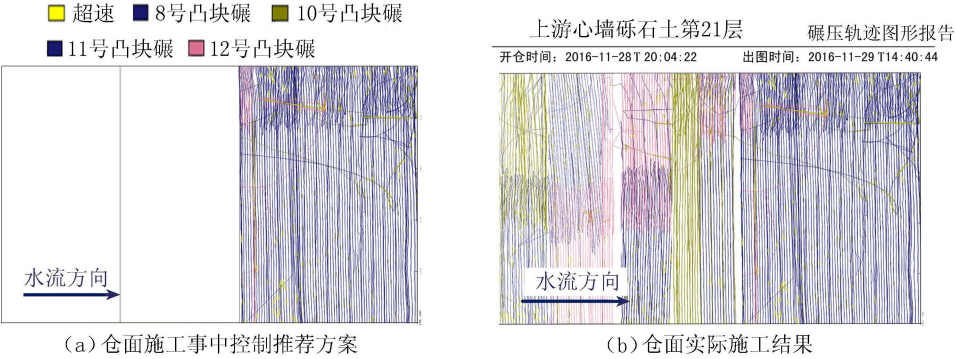


图5 基于事中控制的仓面施工优化方案

Fig.5 Optimized construction scheme of storehouse surface with intermediate control

4 结 语

仓面施工进度是心墙堆石坝仓面施工过程中的重要控制指标,然而,实际施工过程中存在诸多主观及客观因素,给仓面施工进度控制带来难题。笔者提出了仓面施工进度动态仿真控制方法,针对心墙堆石坝仓面施工过程中进度偏差的影响因素,建立基于实时监控的心墙堆石坝施工优化仿真反馈控制模型,并在模型中考虑了对进度偏差的实时反馈机制。

与传统的仓面施工进度控制相比,所提出的基于实时监控的心墙堆石坝施工优化仿真反馈控制模型,对进度偏差能够及时给出合理的优化施工方案,为施工管理者的管理和决策提供有力帮助。将基于实时监控的心墙堆石坝施工优化仿真反馈控制方法应用于中国西南某在建心墙堆石坝工程中,应用效果表明,该反馈模型能够有效地对现场施工进度偏差进行及时动态反馈,并给出推荐的施工方案,为心墙堆石坝大坝仓面施工进度控制提供了保障。

参考文献:

- [1] 王柏乐,刘瑛珍,吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展[J]. 水力发电,2005,31(1):63-65. (WANG Baile,LIU Yingzhen,WU Hehe. New development of China earth and stone dam project construction[J]. Water Power,2005,31(1):63-65. (in Chinese))
- [2] HALPIND W. An investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations[D]. Illinois:University of Illinois,1973.
- [3] BI Lei,REN Bingyu,ZHONG Denghua,et al. Real-time construction schedule analysis of long-distance diversion tunnels based on lithological predictions using a markovprocess[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2014,141(2):04014076.
- [4] MENASSA C C,KAMAT V R,LEE S H,et al. Conceptual framework to optimize building energy consumptionby coupling distributed energy simulation and occupancy models[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2014,28(1):50-62.
- [5] LU Weizhou,OLOFSSON T. Building information modeling and discrete event simulation:towards an integrated framework[J]. Automation in Construction,2014,44:73-83.
- [6] HU Di,MOHAMED Y. Simulation-model-structuring methodology for industrial construction fabrication shops[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2014,140(5):04014002.
- [7] 朱光熙. 二滩水电站双曲拱坝混凝土浇筑的计算机模拟[J]. 系统工程理论与实践,1985,25(3):25-32. (ZHU Guangxi. Computer simulation of the Ertan hydropower station hyperbolic arch dam concreting[J]. Systems Engineering Theory and Practice,1985,25(3):25-32. (in Chinese))
- [8] 钟登华,胡程顺,张静. 高土石坝施工计算机一体化仿真[J]. 天津大学学报(自然科学版),2004,37(10):872-877. (ZHONG Denghua,HU Chengshun,ZHANG Jing. Computer integration simulation for high rockfill dam construction[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2004,37(10):872-877. (in Chinese))
- [9] 钟登华,赵晨生,张平. 高心墙堆石坝坝面碾压施工仿真理论与应用[J]. 中国工程科学,2011,13(12):28-32. (ZHONG Denghua,ZHAO Chensheng,ZHANG Ping. Theory and application of construction simulation for roller compaction of high core rockfill dam[J]. Engineering Sciences,2011,13(12):28-32. (in Chinese))
- [10] 钟登华,陈永兴,常昊天,等. 沥青混凝土心墙堆石坝施工仿真建模与可视化分析[J]. 天津大学学报(自然科学版),2013,46(4):285-290. (ZHONG Denghua,CHEN Yongxing,CHANG Haotian,et al. Construction simulation modeling and visual analysis of rockfill dam with asphalt concrete core[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2013,46(4):285-290. (in Chinese))
- [11] 钟登华,张琴娅,杜荣祥,等. 基于 CATIA 的心墙堆石坝施工动态仿真[J]. 天津大学学报(自然科学版),2015,48(12):1118-1125. (ZHONG Denghua,ZHANG Qinya,DU Rongxiang,et al. Dynamic construction simulation of core rockfill dam based on CATIA platform[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2015,48(12):1118-1125. (in Chinese))
- [12] 钟登华,刘东海,崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学(技术科学),2011,41(8):1027-1034. (ZHONG Denghua,LIU Donghai,CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Science China (Technologica),2011,41(8):1027-1034. (in Chinese))
- [13] LIU Yuxi,ZHONG Denghua,CUI Bo,et al. Study on real-time construction quality monitoring of storehouse surfaces for RCC dams[J]. Automation in Construction,2015,49:100-112.

[14] 钟登华,常昊天,刘宁,等.高堆石坝施工过程的仿真与优化[J].水利学报,2013,44(7):863-872. (ZHONG Denghua, CHANG Haotian, LIU Ning, et al. Simulation and optimization of high rock-filled dam construction operations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7):863-872. (in Chinese))

[15] 刘宁,佟大威,崔博,等.基于监控与预测信息的掺砾土心墙堆石坝施工动态仿真系统研究[J].系统仿真学报,2014,26(2):323-331. (LIU Ning, TONG Dawei, CUI Bo, et al. Study on construction dynamic simulation system for gravelly soil core rockfill dam based on monitor and forecast information[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(2):323-331. (in Chinese))

[16] 钟登华,常峻,任炳昱,等.基于实时监控的高堆石坝施工进度影响因素研究[J].水力发电学报,2014,33(3):239-252. (ZHONG Denghua, CHANG Jun, REN Bingyu, et al. Study on influencing factors of construction progress of high rockfill dam based on real-time monitoring[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3):239-252. (in Chinese))

[17] 张念木.基于实时监控的面板堆石坝施工工期-质量-成本综合优化研究[D].天津:天津大学,2014.

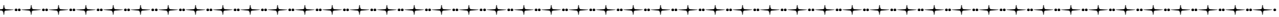
[18] 钟登华,张元坤,吴斌平,等.基于实时监控的碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析[J].河海大学学报(自然科学版), 2016,44(5):377-385. (ZHONG Denghua, ZHANG Yuankun, WU Binping, et al. Simulation and visual analysis for construction of storehouse surface of RCC dam based on real-time monitoring[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5):377-385. (in Chinese))

[19] 任炳昱.高拱坝施工实时控制理论与关键技术研究[D].天津:天津大学,2010.

[20] 吴康新.混凝土高拱坝施工动态仿真与实时控制研究[D].天津:天津大学,2008.

[21] TAE H C, YASSER M, SIMAAN A. Bayesian updating application into simulation in the North Edmonton Sanitary Trunk Tunnel Project[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132:882-894.

[22] DU Rongxiang, ZHONG Denghua, YU Jia, et al. Construction simulation for a core rockfill dam based on optimal construction stages and zones: case study[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 33(3):05015002.



· 简讯 ·

2017 中国水资源高效利用与节水技术论坛将在哈尔滨举办

在中国水利学会等有关单位的支持下,河海大学联合中国水利经济研究会、黑龙江省水利科学研究院共同主办的2017中国水资源高效利用与节水技术论坛拟定于2016年7月27—28日在哈尔滨举办。此次论坛由《水资源保护》编辑部、《水利经济》编辑部、河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心、河海大学水安全与水科学协同创新中心、黑龙江省水利学会和北京沃特咨询有限公司共同承办。

论坛主题为:问道节水,推动水资源高效利用。论坛旨在交流水资源高效利用与节水技术的先进经验,加快推进落实最严格的水资源管理制度,推广节水新技术、保障水资源可持续利用、推进水生态文明建设,展望“十三五”时期节水型社会建设的新思路,活跃学术气氛,激励广大水利科技工作者的积极性和创造性。与会者将通过学习交流,促进产学研合作,开阔视野,拓展思路,结合自己的工作实际解决水资源高效利用科学研究和技术应用中的热点难点问题,共同探讨解决方法和路径,推动水利行业和水利经济的健康发展。

会议详情请关注:[http:// www. sinowbs. com](http://www.sinowbs.com)

(本刊编辑部供稿)