

基于关键链法的塑性混凝土心墙堆石坝施工进度动态缓冲优化

林 雄

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要] 塑性混凝土心墙堆石坝施工工序连续性强, 资源需要量大, 受自然环境因素的影响较大, 常规的进度管理模式很难解决资源限制以及随机变动的问题, 本论文以关键链为基础, 建立了一座大坝工程施工进度的关键链模型, 并且对缓冲种类确定的原则、进度缓冲划分的方法以及在不确定性前提下的动态缓冲调节模式进行了说明, 设计出了施工进度动态监控系统以及预警系统。通过一个实际工程案例的应用证明, 相比于关键线路法、三点估算方法来说, 关键链法可以更好地使计划期缩短, 保证工程的计划完成度更好。关键链法可以很好地应对由于风险因素、人为因素、资源限制等导致的进度落后问题, 在大型水利工程项目进度控制方面具有很高的借鉴意义。研究结果证明, 关键链法注重资源限制综合以及缓冲区统一管理思想, 能够极大地改进堆石坝施工进度计划的稳健性和准确性, 对类似水利工程进度管理有很好的借鉴作用。

[关键词] 关键链法; 塑性混凝土心墙堆石坝; 动态缓冲优化; 施工进度

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19328

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

Dynamic Buffering Optimization of Construction Progress for Plastic Concrete Core Rockfill Dam Based on Critical Chain Method

LIN Xiong

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The construction process of plastic concrete core rockfill dam has strong continuity, requires a large amount of resources, and is greatly affected by natural environmental factors. The conventional schedule management mode is difficult to solve the problems of resource constraints and random changes. Based on the critical chain, this paper establishes a critical chain model for the construction schedule of a dam project, and explains the principles of determining buffer types, the method of dividing schedule buffers, and the dynamic buffer adjustment mode under uncertainty. A dynamic monitoring system and warning system for construction schedule are designed. Through the application of a practical engineering case, it has been proven that compared to the critical path method and three-point estimation method, the critical chain method can better shorten the planning period and ensure better completion of the project plan. The critical chain method can effectively address the problem of delayed progress caused by risk factors, human factors, resource limitations, and other issues, and has high reference value in the progress control of large-scale water conservancy construction projects. The research results have shown that the critical chain method, which emphasizes the integration of resource constraints and the unified management of buffer zones, can greatly improve the robustness and accuracy of the construction schedule of rockfill dams, and has a good reference value for similar water conservancy project schedule management.

Keywords: critical chain method; plastic concrete core rockfill dam; dynamic buffer optimization; construction progress

引言

塑性混凝土心墙堆石坝是重要的水利工程建筑物, 在大坝枢纽的应用十分普遍, 塑性混凝土心墙堆石坝的施工进度管理决定了整个工程的进度和质量管水平。例如对于一座大坝来说, 总填方量达到 117 万 m^3 左右, 最大坝高达 65.5m, 工期总共计划为 36 个月, 所需的主要材料有挖掘机、推土机、振动碾等多种大型机具和人力、运输

设备等, 协调及管理任务艰巨。传统的关键路线法忽视了资源的因素限制, 而计划评估技术很难解决不确定的情况下的时间问题。关键链法是一种面向理论约束的项目管理方法, 通过对项目的关键线路和资源限制进行找出并改进, 从而提升整个项目的效率以及按期完成的概率。本文根据塑性混凝土心墙堆石坝的建设特性建立关键链模型、动态缓冲调整方案, 在此过程中提出一些可供类似工程进度控

制方面的借鉴之处。

1 关键链法理论基础与适用性分析

关键链法起源于项目进度控制当中,它是一种基于资源限制条件下的进度网络分析法,它是在约束理论上发展起来的一种新的项目进度控制方法。关键链上项目的活动就是关键活动,它们是决定整个项目工期长短的关键因素,在进度计划安排过程中为了防止资源瓶颈以及不确定因素的影响预先留出缓冲区并对其加以控制。关键链不仅包含了工序之间的先后联系而且包含了资源之间的先后关系,这是相对于传统的 CPM 仅仅关注工序之间的顺序关系而言的。对于塑性混凝土心墙堆石坝工程而言,整个堆石坝工程包含有坝基开挖、防渗墙铺设、堆石料填筑、心墙浇筑等工序,各个工序存在着密切的相互间资源占用的关系。传统关键路径法忽视了对资源的限制,使得进度安排与实际进度相差甚远,在此情况下关键链法正好可以进行补充;又因为堆石坝的施工受到天气情况,材料供应以及设备状况等许多不确定因素的影响,所以关键链法利用缓冲手段给不确定性留有余地,提高了进度计划的抗风险能力。所以采用关键链法进行塑性混凝土心墙堆石坝施工进度管理非常有必要并且意义重大。

2 某大坝施工进度计划关键链模型构建

堆石坝工程的分项可以分为:坝基开挖及准备、帷幕灌浆施工、堆石料填筑、心墙塑性混凝土浇筑、上游护坡及下游排水体施工等,各个项目之间的先后依赖关系较为严格并且有较强的资源争夺,项目的周期使用三点估算的方法进行估计,计算得出的期望工期能够更准确地体现出由于气候变化以及地质环境改变所引起的时间上的不确定情况。资源限制确认就是建立关键链模型的重点部分,在堆石坝中资源间的冲突主要是大型机械设备的占用以及运送车辆的需求重合。关键链方法注重资源限制以及缓冲区控制有利于降低项目延期的风险,在受到限制的情况下使用资源限制调整的方法解决资源配置存在的矛盾,首先找出限制因素再对工作进行排序使资源利用更加均衡有效,在找到限制因素之后以资源优先配置的原则为基础,运用启发式的方法进一步寻找出关键链,也就是经过资源限制的最长的工序组合。对于堆石坝工程来说,心墙浇筑、堆石料填筑等主体工程所需的主要材料最多应该给它们优先配置,所以它们所形成的相关资源限制调整后的网络路线就是关键链。

3 施工进度缓冲设置与优化方法

3.1 缓冲类型及设置原则

关键链法主要是通过设置三类缓冲来规避施工过程中存在的不确定因素及风险,这方面的缓冲包括以下三种

类型:第一是项目缓冲,在关键链之后设立用来抵消整个关键链上关键工作的滞后给整个项目的工期带来的影响;第二是汇入缓冲,在非关键链和关键链交汇的地方设立,用来抵消非关键环节上出现的问题对关键环节的影响;第三是资源缓冲,在关键路径上设立一个警戒线,防止由于资源紧张的问题导致关键工作推迟;在堆石坝施工过程中把项目缓冲设在了关键链终点,是为了缓冲整个关键链上面各种工序产生的累积延误的时间段;汇入缓冲设在了非关键链与关键链交汇的地方;还有资源缓冲设在了关键资源的需要地点的前部。缓冲设定的基本原则有三点:缓冲大小要与工序的不确定度相适应,不确定性较高的工序应该预留相对较大的缓冲时间;缓冲设定要实行总控策略,在每个工序的安全时间上进行汇总成为项目的缓冲,避免多个工序的安全时间分散消耗;缓冲地点的选择要考虑网络特性,在关键链与非关键链的交界处一定要设立汇入缓冲,以免发生非关键链延误传递到关键链上的问题。

3.2 进度缓冲分配策略

进度缓冲的分配办法规定了缓冲资源在工程项目各个时间段以及各个工作环节上的分配方案,分配规则应该既要考虑整个工程项目的总工期也要顾及每一阶段的风险,使所分配出来的缓冲得到充分利用,常用的缓冲分配模式有均匀分配模式、风险加权分配模式以及动态反馈分配模式三种。均匀分配模式就是把缓冲按照工序的数量以及工期的比例平均分配下去,便于操作但是忽视了各个工序之间的风险差别性,风险加权分配模式是针对不同的工序的不确定性的的大小给出相应的系数,高风险工序分配更多的缓冲,在堆石坝施工过程中的一些主要工序例如防渗墙施工、心墙浇筑等就可以这样分配。动态反馈分配方案是在项目的整个实施过程中随着项目的实际进程偏差与风险的发展变化,对缓冲进行及时修正。针对目前施工项目的进度控制关键路径法中,存在的缓冲计算不够精确,缓冲控制与施工现场不相符合的情况,可以考虑添加风险调控系数、资源影响系数、工序复杂性系数、工序的位置系数及环境系数五项参数,用层次分析法加 CRITIC 法来建立缓冲区的改进模型^[1],现场操作的时候推荐堆石坝施工项目选择风险权重分配方式,在关键路径段落占用比例以及汇聚节点的网络复杂程度之间进行比例确定,使重要工序有充足的缓冲空间。

3.3 基于不确定性的动态缓冲调整模型

混凝土重力坝施工不确定性的来源众多,比如地质问题、恶劣气候条件、机械故障、物料短缺等,对于施工进

度产生的影响大小会随着施工的不同阶段发生变化。动态缓冲调节机制的基本思路是基于当前在建过程中不确定性水平的变化来实时调整缓冲量及分配方式,在检测到无法预料的风险增大时会及时向高危环节进行缓冲补充,在风险减弱或者施工环境好转的情况下,将盈余缓冲回收至整个项目的储备库以应对以后可能出现的问题。它的输入变量主要有各个工作面进度偏差率、资源短缺指数、环境因素等,输出结果则是经过修正之后每个施工阶段缓冲分配安排以及调整后关键路径网络图。

4 施工进度动态监测与缓冲优化机制

4.1 施工进度动态监测体系构建

施工进度动态监控系统的建立是实施好关键链法的重要保证。此系统以实时收集及动态汇报为目的,在此基础上借助自动化的检测仪器以及信息化管理系统来实时监控堆石坝工程各个工序的当前进度及计划进度,整个系统的组成分为三个模块,即数据采集模块、分析模块和预警模块,其中数据采集模块主要包括现场的传感器以及定位装置以及手工填写等方式来得到工序进度、资源投入以及施工现场状况等数据,分析模块则是通过对这些数据采用进度偏差分析和缓冲消耗计算的方法来进行处理,最后预警模块会基于数据分析的结果发出警报并提出相应的改进措施^[2]。在堆石坝工程中,应该注意心墙浇筑速度、堆石料堆填速度以及防渗墙的质量等重要参数,利用建立进度-资源-质量一体化监控体系来进行综合协调控制管理。

4.2 缓冲消耗指标与预警机制

缓冲消耗指标是用于判断工程施工进展情况是否正常的主要参考标准,有效的预警机制可以在工程进度滞后之前给予提醒,让项目经理有时间进行纠正处理。常用的缓冲消耗指标有两个方面,一个是缓冲消耗率,另一个是进度完成率,二者之间的对比情况就可以反映出工程进度的实际风险程度。高德拉特对于缓冲区域的管理是以“三

色”管理的方式来进行的,把缓冲区域分为三段,每一阶段用绿色、黄色以及红色来代表,工程实施中观察缓冲区域使用程度,在缓冲区域使用程度处于绿色状态下则工程运行良好;而在缓冲区域使用状态处在黄色状况就一般不用做过多处理,只需对其进行持续观测,并做出相对应的风险预案。当缓冲池已经被使用至红区时就意味着该项目建设存在着较大的延误危险,需做出一定的应对方案。把缓冲耗用指标同项目的工序链完成百分比相挂钩,设计了缓冲区监控机制可以进行实时性地对缓冲情况进行跟踪检查。为了使项目缓冲可以起到更好的风险抵御效果,在缓冲监控的时候也需要重视下接驳链路溢出导致的关键链中断问题,预警级别如下表所示,预警级别的门限可根据工程所面临的风险度大小来进行调节。

4.3 动态缓冲调整方法

动态缓冲调整策略是在警报发出之后,对缓冲实施主动控制的方法。传统静默状态下设置的固定缓冲量仅仅是在制定整个项目计划的时候进行一次性的设定,在实际项目的开展过程中缺少对缓冲状况的实时监测以及调节的能力,很难应对堆石坝施工过程中不确定性的随机波动。其具体的调节方式主要有三种:缓冲引入即对于一些高危的关键步骤在前、后工序间增加一定的间隔性的时间作为缓冲;缓冲消散就是在风险降低或者环境变得有利的情况下,把多余的缓冲拿出来再分给其他的后续步骤;缓冲重新配置就是依据各个工序的实际进展情况还有潜在的风险情况来重新安排缓冲的比例分配情况^[3]。三种手段既可以单独适用也可以相互配合实施,根据缓冲消耗速率与进度完成速率之间的偏差程度动态切换。如在浇筑心墙工序受到寒冬天气影响导致滞后的情况下,可以利用缓冲嵌入法对这个工序进行追加的时间缓冲,同时也释放一部分滞后的风险较小的工序的富余缓冲给它做调配。

表1 缓冲消耗预警等级划分表

| 预警等级 | 缓冲消耗率 (B/总缓冲) | 缓冲消耗与进度完成率关系 | 风险描述 | 响应措施 |
|---------|---------------|----------------|---------------|--------------------|
| 绿色 (正常) | <30% | 缓冲消耗率 ≤ 进度完成率 | 施工进度正常, 风险可控 | 常规监控, 定期复核 |
| 黄色 (关注) | 30%~60% | 缓冲消耗率略高于进度完成率 | 存在潜在风险, 需持续关注 | 加强监测频次, 分析偏差原因 |
| 橙色 (警告) | 60%~80% | 缓冲消耗率明显高于进度完成率 | 风险正在加速累积 | 启动纠偏方案, 调整资源分配 |
| 红色 (紧急) | >80% | 缓冲消耗率远高于进度完成率 | 严重延误风险, 需立即干预 | 紧急调动备用资源, 实施动态缓冲追加 |

4.4 进度偏差分析与纠偏措施

进度偏差的原因分析是确定造成进度偏差的主要因素以及有针对性地提出纠正方法的基础。偏差原因分析一般从工序方面、资源方面两方面考虑,工序方面的偏差指的是工序实际耗时与计划耗时之间的差距以及造成偏差的内外部原因;而资源方面的偏差分析主要包括资源冲突问题、设备故障、人员安排等问题引起的进度延误。堆石坝项目进度偏差的具体原因主要有堆石料不够、心墙浇筑受限于天气温度、大型机械突发故障停工、雨期施工效率降低等^[4]。不同的原因需要区别对待,制定不同的纠正方法。针对资源偏差可以采取加大机械台班投入、合理安排运输线路、改变施工工序的方式去解决资源问题;针对环境偏差需要预先拟订好相关的季节性施工应对方案如:冬季保暖措施、雨天防水排涝方案等;对于技术偏差则要召开专项的技术会议研究技术难题,调整施工工艺参数,在采用纠偏措施之后还要通过缓冲消耗监视来检验纠偏成效,实行“检测-报警-调节-验证”式循环管理模式,保证工程施工进展时刻处在受控范围内。

5 结语

塑性混凝土心墙堆石坝的施工过程工序繁杂,资源制约密集以及不确定因素较多,传统的进度管理方式难以解决此类问题,在此背景下提出了一种基于关键链法而设计的针对堆石坝施工进度的动态缓冲优化体系框架,包括关键链建模、缓冲设定以及分配、动态监控预警、偏差处理

及调整等一系列流程。关键链项目管理是约束理论应用于项目管理中的一种方法,它的资源管控融合以及缓冲集约化管理思想使堆石坝施工进度计划更加强健可靠。通过研究发现,应用多因素缓冲优化模型、动态监测手段能够有效地提前完成预定施工期以及实施动态监测,为水利工程项目的进度控制提供了较好的参考建议,未来可以进一步结合智能技术的应用来对动态缓冲区进行管理,比如可以采用机器学习等方法来对不确定性的因素建立相应的预测模型或者借助 BIM 技术实现对进度与成本的同步动态调整,可以将其运用于更大的范围内的堆石坝工程之中。

[参考文献]

- [1]李恒强.基于关键链法的工程项目进度管理与优化策略[J].建设监理,2025(11):23-26.
- [2]李鹏飞,肖海波,杜治军,等.关键链法在大型建筑施工项目进度管理中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2025(13):75-77.
- [3]陈静.基于信息化平台的关键链法结合 BIM 项目施工进度优化策略[J].办公自动化,2025,30(14):1-3.
- [4]乔亚昆,余金凤,黄莹,等.关键链法在大型水利工程项目进度管理中的应用研究[J].红水河,2022,41(3):1-4.

作者简介:林雄(1991.2—),男,毕业院校:成都大学,所学专业:材料成型及控制工程,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目副经理,职称级别:高级工程师。