

Research on Optimization of Foundation Construction Schedule and On-site Coordination Management

Zituan Zhao

Wuhan Sinomach Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430032, China

Abstract

In response to issues such as resource tempo mismatch, sensitive process connection, and unquantified time window constraints in foundation construction, a pull-type tempo model based on the critical path method, integrating resource-constrained scheduling and night supply windows, is constructed. It is accompanied by a dynamic optimization process and on-site coordination mechanism of monitoring - deviation analysis - re-calculation of plans - feedback of effects. It is verified in a pile foundation project of a certain research park. Taking the pouring capacity from 22:00 to 06:00 at night as the anchor point, the upper limits of hole formation and cage release are inferred in reverse, and equipment zoning and double buffering strategies are implemented. The research shows that explicitly presenting bottlenecks as tempo constraints and driving scheduling with time windows can achieve coordinated optimization of project duration, resources, and costs.

Keywords

Critical Path Method; Resource-constrained Scheduling; Pull-based Rhythm; Dynamic Optimization; Foundation Construction

地基施工进度计划优化与现场协调管理研究

赵紫团

武汉国机岩土工程有限责任公司, 中国 · 湖北 武汉 430032

摘要

针对地基施工存在的资源节拍错位、工序衔接敏感与时窗约束未量化等问题, 构建以关键路径法为基底、融合资源受限调度与夜间供应窗口的拉动式节拍模型, 并配套监测—偏差分析—方案重算—效果反馈的动态优化流程与现场协调机制。在某科研园桩基工程中落地验证。以夜间22:00至06:00灌注能力为锚点, 反推成孔与下笼释放上限, 实施设备分区与双缓冲策略。研究表明, 将瓶颈显性化为节拍约束并以时窗驱动调度, 可实现工期、资源与成本的协同优化。

关键词

关键路径法; 资源受限调度; 拉动式节拍; 动态优化; 地基施工

1 引言

城市地基工程作业面受限、交叉作业密集, 施工过程呈现强工序依赖与多重外部约束并存的特性。设备台班、钢筋笼加工与混凝土供应的节拍常常难以匹配, 再叠加夜间噪声限制、交通管控与雨季扰动, 传统以静态网络为主的进度计划难以维持稳定执行, 形成候浇排队、等待切换与返工放大的连锁效应。既有方法偏重关键路径的确定性求解, 往往忽略时窗与资源耦合, 使总时差与关键链条在落地阶段迅速失真。基于此, 亟须一种能够把灌注窗口、设备能力与材料供应统一纳入调度域的计划方法, 将瓶颈转译为可执行的节拍规则, 并在滚动周期内实现偏差识别与快速调参^[1]。本研究以关键路径法为算法基底, 叠加资源受限调度与时窗建

模, 构建以夜间灌注能力为牵引的拉动式节拍控制, 并通过监测闭环与现场协同机制支撑落地执行。在典型桩基场景中进行实证, 旨在为受城市管控约束的地基施工提供可复制的进度优化范式。

2 地基施工进度计划优化的现存瓶颈分析

围绕地基施工进度计划的编制与执行, 现实场景中暴露的瓶颈多与资源、工序和风险认知相关。鉴于作业面受限与交叉作业密集的特性, 资源配置呈现结构性失衡: 设备台班与钢筋笼、混凝土、泥浆等供给节拍难以匹配, 计划节拍被频繁打断, 资源均衡与高峰削减难以同步推进。从工序衔接来看, 成孔、清孔、下笼、灌注等关键环节对时间窗高度敏感, 而检测、验收与支护转换缺乏统一切换规则, 形成等待与返工的隐性时滞。在风险识别层面, 突发强降雨、围护渗漏、交通限行与夜间噪声限制作业时段等约束未被充分量化, 计划浮动设置偏窄, 累积扰动被放大。结合成都高新区

作者简介: 赵紫团 (1980-), 男, 中国河南平顶山人, 硕士, 助理工程师, 从事地基基础研究。

中和片区 T5 科研园地基工程的进度记录：合同工期 120 d，钻孔灌注桩 680 根，基坑面积 18000 m²，计划配置旋挖钻 5 台但到场仅 3 台，钢筋笼加工日产能 14 套，而混凝土供应窗口集中在 22:00 至 6:00。资源节拍错位使单桩平均候浇时间上升至 4 h，雨季井点降水加密导致停机次数上升，周计划兑现率持续低于 70%。关键路径是控制总工期的最长工序链条，由此可以把瓶颈对关键路径产生的延展效应具体化，为后续基于约束识别与节拍重构的优化提供可追溯依据^[2]。

3 地基施工进度计划优化的方法体系构建

3.1 基于关键路径法的进度计划优化模型

鉴于地基工程存在工序依赖紧密与时窗约束并存的特性，本研究把关键路径法当作基底算法来构建网络计划模型。活动被定义为单桩成孔、清孔、下笼、灌注以及检验验收等可度量作业，节点表征信息交接与状态切换，依靠前锋与回退运算得到最早开始与最迟完成时点，并把总时差作为约束识别的直接指标。从逻辑建模上看，单桩内选用完成开始关联，桩间选用开始开始关联并设置最小间隔以体现设备移位与场地转换，灌注作业附加夜间供应日历以体现供应窗口，检验与支护转换以最小时滞把切换过程编码进网络。该网络在未引入资源限制的条件下给出决定性工期与关键链条，为后续节拍重构提供参考基线^[3]。

结合成都高新区中和片区 T5 科研园桩基情境，网络中呈现的关键链条主要由成孔、清孔、下笼、灌注与承载检测构成，表现为由成孔启动至灌注完成的最长作业序列。进一步观察发现，灌注时窗把上游工序的可行起点向后推移，总时差在下笼与灌注之间收敛至接近零，从而把该段链条固化为关键路径。本研究立足于此，在不引入资源约束的前提下，把灌注设置为时窗驱动的锚点，向前配置清孔与下笼的提前量并压缩非关键作业的时滞，使单桩内顺序固定、桩间穿插满足最小间隔，从而得到契合现场逻辑的最优施工顺序。为使关键路径的识别与工期评估具备可量化工具，关键路径工期采用路径求和的最大值来表征。

$$T_{CP} = \max_{P \in \Omega} \sum_{i \in P} d_i$$

其中， T_{CP} 表示关键路径工期，单位为 d， Ω 为由开工节点到竣工节点的全部可行工序链集合， P 表示集合 Ω 中的一条工序链， d_i 为工序 i 的确定性持续时间，单位为 d。

3.2 考虑资源约束的进度调整策略

围绕资源受限这一核心约束展开，需把机械能力、劳动力组织与材料供给的耦合关系转化为可执行的节拍控制规则。基于地基施工工序存在强前后依赖与时窗共存特性，资源均衡的目标不在于追求单点最高产能，而在于把上游成孔与下游灌注的产出率在滚动周期内保持近似匹配，同时把在制工序数量控制在可被夜间灌注窗口消纳的范围。由此推导，进度调整应采用灌注能力为牵引的拉动式节拍控

制，将夜间混凝土供应窗口作为约束上限，把清孔与下笼的释放节奏向后对齐，并在桩间级别设定最小间隔与设备移位时间，使资源峰值被削减到可持续水平。需重点关注的是，劳动力班组与机械台班应按工序节拍进行解耦编组，例如将成孔与下笼分别设置固定班底，灌注设置独立夜班，并把跨工序的通用工种安排为机动梯队以承接波动。

结合某科研园桩基情境，资源分配方案围绕 3 台旋挖钻、夜间窗口 22:00-06:00、钢筋笼日产能 14 套进行重构。本研究把夜间灌注能力作为锚点，设定每夜目标灌注桩数为稳定区间，并据此反推白天成孔与下笼的释放上限，避免形成过量待浇队列。为降低移位损失与材料运输不确定性，以施工区块为单位进行设备分区作业，把 3 台旋挖钻分别固定在相邻作业面内推进，错峰形成稳定产出。同时在材料侧设置双缓冲策略，白天完成钢筋笼集中预制与场内短倒，夜间两台泵送设备并行，一台作为冗余，以适应运输波动与坍落度时限。劳动力组织采用日夜两套排班，白天配置成孔与下笼专业工，夜间配置灌注与检测工序专职班组，并把检验与支护转换安排为靠近灌注时点的小时滞作业，以缩短等待链。为进一步抑制高峰负荷，桩号排序采取以灌注优先为原则的优先级队列策略，把清孔完成时间早、临近道路便于运输、地质条件稳定的桩位优先进入夜间计划。与之配套，设置在制桩上限并实施超限预警，超过上限时暂停新增成孔任务，转为设备保养与场地整备，从而让资源占用回落到可控区间。上述策略把资源瓶颈显性化为节拍约束，并把进度调整落实为跨工序的匹配与削峰，使计划从静态时程转向面向资源的可执行序列。

3.3 进度计划动态优化的实施流程

围绕地基施工的时窗与资源耦合特性，本研究把进度计划动态优化构造成监测、偏差分析、方案调整、效果反馈的闭环流程。监测环节依靠小时级数据采集，把成孔进度、清孔合格率、钢筋笼到位、夜间灌注完成桩数、候浇时长、设备停机缘由及降雨限行信息纳入同一数据面板。偏差分析环节以关键路径基线与滚动产出为参照，识别进度滞后、在制桩超限与时窗压缩三类主偏差，并把约束归并为设备能力、材料供应、工序切换与外部扰动四类。方案调整环节以夜间灌注能力为牵引，先进行网络重算并更新作业日历，再把清孔与下笼的释放节奏向后对齐，同时设定在制桩上限与设备移位最小间隔，形成可执行序列。效果反馈环节围绕周计划兑现率、单桩候浇时长与设备有效工时比开展复盘，把调整结果写入下一周期基线。

4 地基施工进度优化方案的现场协调管理效果评估

4.1 现场协调管理的实施路径

鉴于地基施工受夜间供应时窗与多专业交叉的双重制约，本研究把现场协调管理构建为贯通组织、流程与信息三层联动的实施路径。跨部门协调机制方面，围绕总承包、

桩基分包、商混站、钢筋加工、检测与监理、运输与交通联络等关键接口，设置以工区为单元的协调链条，把白天与夜间两条作业链进行分区指挥，形成以夜间灌注能力为牵引的统一节拍。结合成都高新区中和片区 T5 科研园桩基工程的组织实践，日间由工区调度长统筹旋挖钻与钢筋笼供应，16:00 召开滚动协调会，固化当夜灌注清单与车辆通行批次；夜间由灌注指挥长统一调度泵车与运输车辆，并把坍塌度时限、道路口岸放行以及泵送切换的时序纳入同一指挥频点。责任分配矩阵明确各接口在节点时点的交付物与触发条件，把跨单位职责冲突转化为可审计的交付清单，进而稳定夜间窗口内的执行韧性^[4]。

4.2 优化方案的效果量化分析

围绕以夜间灌注窗口牵引的节拍重构，本研究把工期、资源、成本与执行稳定性四类指标整合为同一评价口径，以便把计划层的优化逻辑与现场执行的量化反馈进行闭环衔接。工期维度关注总工期以及关键路径受扰时长，资源维度选用设备有效工时比、综合资源利用率与混凝土供应及时率，成本维度以单位桩综合直接成本和成本节约率进行衡量，执行稳定性维度则借助周计划兑现率与单桩候浇时长反映波动收敛程度。结合成都高新区中和片区 T5 科研园的组织方式，把优化前后数据进行并列对照，见表 1；在 120 d 合同工期、3 台旋挖钻与 22:00 至 06:00 供应窗口的既定约束下，节拍重构使关键指标成组改善。由此可见，工期缩短、资源均衡与成本收敛在统一日历下得以协同推进，为进度优化的规模化复制提供了数据化依据。

5 结语

研究以夜间灌注窗口为锚点对地基施工节拍进行重构，形成从计划到执行的一体化框架。核心在于用拉动式逻辑匹配上游成孔与下游灌注产出率，以在制桩上限、设备移位最小间隔与材料双缓冲作为控制杆，配合日夜分工的组织编排与跨部门协同链条，使关键工序在受限窗内保持稳定节奏^[5]。实证结果显示，工期、资源利用与成本指标实现同步改善，关键路径受扰显著收敛，验证了瓶颈显性化与节拍化控制的有效性。管理层面，分区作业减少无效移动，冗余泵送与机动班组增强了对供应波动与天气扰动的抗压能力，动态监测与滚动重算提升了计划韧性。方法具备在类似城市桩基工程的可推广性，但对数据粒度、供应可靠性与组织协同提出更高要求。后续将引入更细颗粒的工序数据与仿真优化，结合概率性天气与交通情境进行多场景稳健调度，并进一步拓展至基坑支护与承台等后续工序，完善成本与风险协同控制。

参考文献

- [1] 于志东,董道德,蒋友宝,陈刚,黄启超.基于数值模拟的软土路基和高边坡优化设计研究——以某地铁停车场为例[J].实验技术与管理,2025,(06):165-173.
- [2] 张剑伟,陈晓波,张晶.基于物联网技术的建筑工程施工进度管理系统设计[J].电脑知识与技术,2025,21(17):108-110.
- [3] 朱文静.煤化工项目建设中进度管理与调度优化研究[J].煤化工,2025,53(05):82-84.
- [4] 陈俊凯.建筑施工企业全面预算管理的优化策略——以Q集团为例[J].上海企业,2025,(07):157-159.
- [5] 周琦云,岳龙,何瑞.市政工程中基于BIM的进度与成本协同控制研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):151-153.

表 1 某地基工程项目进度优化效果对比表

| 指标 | 优化前 | 优化后 | 变化幅度 |
|-----------|---------------|---------------|-----------|
| 总工期 | 120 d | 95 d | -20.8% |
| 综合资源利用率 | 75% | 90% | +15.0 百分点 |
| 周计划兑现率 | 68% | 92% | +24.0 百分点 |
| 单桩候浇时长 | 4.0 h | 1.5 h | -62.5% |
| 设备有效工时比 | 0.62 | 0.82 | +0.20 |
| 混凝土供应及时率 | 78% | 96% | +18.0 百分点 |
| 单位桩综合直接成本 | 9800 CNY/pile | 9100 CNY/pile | -7.1% |
| 成本节约率 | 0% | 7.1% | +7.1 百分点 |
| 关键路径受扰时长 | 16 d | 6 d | -62.5% |