

LNG 储罐桩基工程施工质量控制数据采集与分析应用

苏展 段品佳 刘洋 程昊 (中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 桩基工程是大型 LNG 全容储罐施工的第一道工序和工程质量的关键因素。某 LNG 接收站工程为优化项目工期, 储罐桩基工程采用桩身与桩帽一体化成桩工艺, 为确保工程质量, 结合全生命周期管理要求, 开展全程实时跟踪桩基过程控制记录, 通过数据分析及时进行风险纠偏, 提出施工质量和进度优化控制措施, 确保项目桩基工程在既定工期内的如期完成, 质量控制达到预期要求。

关键词: LNG 全容储罐; 桩基工程; 数据采集; 质量控制

1 前言

液化天然气 (LNG) 全容储罐是 LNG 接收站存储和周转液化天然气的常见容器, 大型 LNG 全容储罐的有效容积在 $16 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上, 由混凝土外罐和 X7Ni9 钢内罐组成。LNG 储罐一般工程建设周期约 30-36 个月, 储罐整体施工关键路径依次为桩基、承台、墙体、气升顶、穹顶、内罐安装、水压和气压试验、罐内保冷、收尾等, 其中桩基工程作为 LNG 全容储罐施工的第一道工序, 既是工程质量的关键因素, 也是其他工序的前置条件。东部沿海某 LNG 接收站工程, 新建 3 座 $16 \times 10^8 \text{m}^3$ 全容储罐, 每个 LNG 储罐直径 84m。为了优化项目工期, 桩基工程创新采用一体化成桩工艺, 对工程项目管理和施工质量控制带来全新挑战。为此, 项目按照全生命周期管理要求, 实时采集桩基工程施工过程数据, 并通过数据分析及时进行风险纠偏, 确保项目桩基工程实施进度和质量控制达到预期要求, 取得良好效果。

2 桩基工程施工工序

项目 LNG 全容储罐桩基础采用泥浆护壁旋挖成孔灌注端承桩, 桩身与桩帽一体化成桩方案。一体化成桩有利于缩短项目工期, 减少桩帽施工工序, 降低人、材、机投入成本。每个 LNG 储罐设计工程桩 410 根, 3 个储罐共计 1230 根。桩基的主要作用是承受和分配上部储罐和液仓货物的竖向荷载, 还同时承担地震等突发地质灾害引发的水平荷载, 关系储罐的结构寿命和安全性能。桩基与大体积混凝土承台固结, 工程桩分为外圈桩和中心桩, 桩径 1.2m, 基底持力层为中风化凝灰岩, 设计入岩深度不低于 1.5m。桩基钢筋笼材料选用规格为 HBR400E 的钢筋, 采用机械接头连接, 钢筋笼间搭接加焊连接。根据详勘资料推测, 工程桩混凝土设计用量约为 $7.5 \times 10^4 \text{m}^3$, 钢筋用量 $1 \times 10^4 \text{t}$ 。

桩基工程施工关键工序依次为桩位测放、护筒埋设、旋挖钻进、一次清孔、钢筋笼吊装、二次清孔、沉渣厚度检查, 地面以下混凝土浇筑、提拔导管和护筒、桩顶超灌与混凝土清理, 模板垫层浇筑、支设地面模板、地面以上混凝土浇筑、拆除模板和养护等。该工法的特点是地下混凝土浇筑后, 在设计规定的时间内完成地面支模和地上桩身混凝土浇筑, 不需要经过传统桩帽施工的破桩头工序, 并减少了 1 道施工冷缝, 保障了桩身完整性, 提高施工质量, 加快施工进度。施工过程中的关键技术在于短柱与灌注桩的衔接和桩柱中心的重合, 对施工承包单位的组织能力、人员专业素质、机具设备可靠性的要求较高。

3 施工过程数据采集

3.1 数据采集模板

项目桩基工程施工过程中, 全程实时跟踪记录桩基过程控制记录, 包括桩基定位、入岩及终孔判定、钢筋笼制作、安装, 混凝土检测、超灌取样、桩基完工记录等, 并建立储罐桩基和中风化基底的三维模型和控制参数计算模型, 评估施工进度、施工工序和施工作业量和施工时间的关系, 实现桩基工程施工数据的可视化分析 (图 1)。

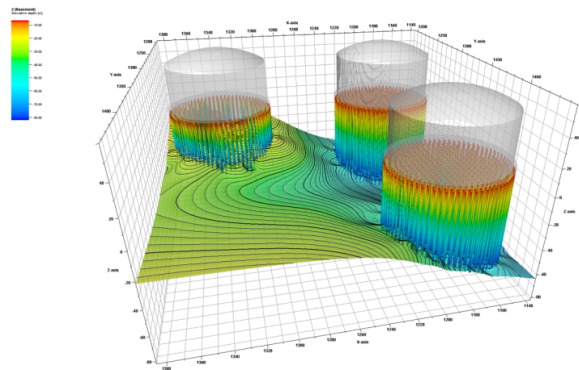


图 1 LNG 全容储罐桩基工程三维建模

项目施工前根据施工工序和质量控制点确定数据采集参数,制定 LNG 全容储罐桩基工程施工数据采集模板,由施工单位技术员、总包质量管理人员、监理等共同对控制点进行检验和记录,并汇总记录到信息系统。桩基施工的常见问题包括护筒偏斜、堵管、塌孔、断桩等,质量影响控制因素主要包括钢筋笼制作、混凝土质量、泥浆质量、钻孔质量、孔位控制质量、浇筑质量等。

根据施工方案制定的采集模板的关键输入参数包括桩号,钻机编号,设计桩顶标高,护筒标高,桩位坐标,旋挖开始时间,确定入岩时间,入岩测量深度,确定终孔时间,终孔测量深度,两次清孔的泥浆比重、含砂量、黏度和 pH 值,实测钢筋笼长度,钢筋笼顶水平偏差,导管长度,地下和地上混凝土浇筑的开始时间、结束时间、塌落度、实际浇筑量等。

根据输入参数,结合桩基工程设计文件和检验、试验计划要求,可自动计算关键控制参数,包括护筒偏差,土层旋挖耗时,入岩标高,岩层旋挖耗时,实际孔底标高,入岩深度、实际地下桩长,实际一体桩长,设计笼顶标高,设计钢筋笼长度,吊筋长度,实际笼长偏差,浇筑前孔深,终孔-地下和地下-地面混凝土浇筑间隔时间,地下和地上混凝土浇筑耗时、理论浇筑量和充盈系数等。

3.2 数据统计结果

桩基工程自 7 月中旬开工,11 月底完工,耗时 4.6 个月,3 个储罐合计完成 1230 根工程桩(表 1),总计地下掘进进尺超过 $6.5 \times 10^4 \text{m}$,混凝土理论用量 $7.7 \times 10^4 \text{m}^3$,实际累计浇筑混凝土约 $8.3 \times 10^4 \text{m}^3$,平均充盈系数 1.07,钢筋用量约 $1.06 \times 10^4 \text{t}$ 。经桩基检测,1230 根桩基全部合格,I 类桩比率 98% 以上。

表 1 桩基工程施工数据统计表

采集样本桩数	总成孔进尺 (m)	总施工桩长 (m)	单桩最大桩长 (m)	单桩最小桩长 (m)
1230	65581	68149	84.27	20.76
混凝土理论总用量 (m^3)	混凝土实际总用量 (m^3)	平均单桩施工耗时 (h)	平均土层旋挖速率 (m/h)	平均岩层旋挖速率 (m/h)
77075	83231	38.20	4.44	0.32

4 施工过程数据分析与质量控制应用

4.1 护筒安放与桩位复测控制

结合桩位测放和护筒复测结果,发现本项目护筒

直径 1.3m,桩径 1.2m,旋挖过程中钻头与护筒的间距仅为 50mm,由于护筒在完成地下桩浇筑后拔出的过程中容易造成变形,将影响下一次护筒安放后对护筒中心与桩心偏差的复测;同时,由于护筒变形内径变小,在钻机起下钻过程中更容易出现钻头与护筒磕碰,造成护筒移位,而钢筋笼安装又是根据埋设的护筒进行位置控制,最终可能出现笼心偏差过大,在地上桩支模后造成模板与钢筋笼的保护层厚度不足,此时再调整钢筋笼只能用机具拖纤绳拖拽顶部钢筋笼,既可能破坏钢筋笼,也可能扰动地下桩混凝土,出现缝隙。对此及时提出整改措施,定期检查护筒直径,旋挖过程中做好钻头与护筒磕碰记录,及时复测护筒偏差。

4.2 钢筋笼顶标高控制

钢筋笼顶标高数据分析和现场复测发现,项目施工过程中多次出现钢筋笼下沉现象。可能的原因,一方面计算吊筋长度时,是考虑护筒标高和笼顶标高之差,而吊筋一般是通过钢管置放在护筒盘的枕木上,枕木标高与护筒标高之间有偏差;另一方面,如果穿吊筋的钢管所支撑的平台与地面接触面积小,钢筋笼、导管重量大,压在平台上,导致钢筋笼下沉。对此提出控制措施,后续钢筋笼安放时,吊筋应搭在安放于护筒边的枕木上,并且在安放最后一节钢筋笼时测量枕木顶标高,据此标高计算钢筋笼吊筋,控制笼顶标高;同时增大平台脚与地面接触面积,以防钢筋笼下沉;不得将钢筋笼吊筋搭在护筒上,导致因护筒下沉而造成钢筋笼下沉。

4.3 终孔-浇筑间隔时间控制

泥浆护壁灌注桩,应当尽量缩短终孔-浇筑间隔时间,防止成孔后土层在泥浆中过度浸泡,造成塌孔或缩径,影响桩身质量。根据已采集记录,项目在施工初期,终孔-浇筑间隔耗时是制约桩基施工进度的主要因素之一,特别在于终孔深度较长的 2# 罐,平均的间隔耗时接近 28h(图 2)。原因在于,钢筋笼吊装方案设计的最大钢筋笼吊装长度较短,由于桩长较长,导致增加了吊装次数,影响了施工进度,也不利于工程质量。后续从设计上优化钢筋笼标准节的长度,通过调配更大规格的履带吊车,同时积极推动钢筋笼吊装方案的重新优化和专项安全审查,将原 18m 钢筋笼标准节,调整为钢筋笼单节长度不大于 25m,分 2-4 段制作,减少标准节数量,从而减少了单个工程桩的钢筋笼吊装次数,缩短了单桩钢筋笼下放总耗

时。经过优化，终孔 - 地下砼浇筑前的平均间隔从施工初期的 28h 降低到到最终的 9h，缩短幅度高达 67.86%，保障了项目的施工进度。

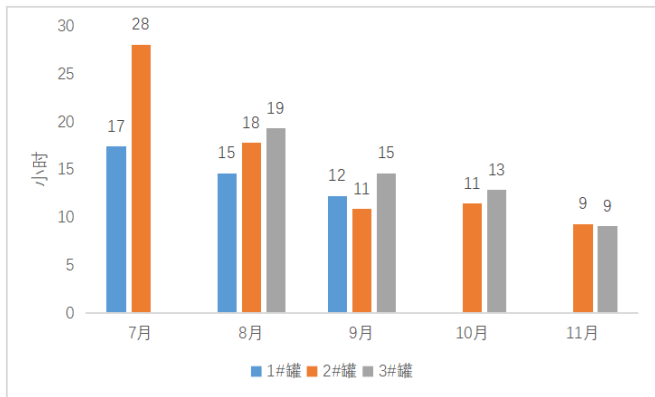


图2 终孔 - 浇筑间隔时间统计

4.4 施工进度预警与效率优化控制

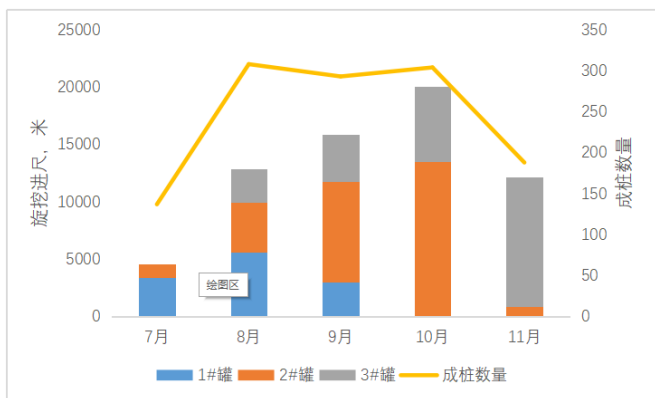


图3 工程桩施工完桩进度统计图

本项目为了保障工程桩进度如期完成，在工程桩施工高峰期的8月至10月，应至少保证月完工桩数达到300根。在传统的进度统计上，一般采用的是每日完成浇筑的桩数作为指标，由于单罐平均设计桩长在30m（1#罐）到60m（3#罐）不等，相差接近一倍，因此成桩桩数不能真实反馈实际的施工工程量。根据本项目采集数据统计分析，8月份3个储罐工程桩同时施工，月旋挖总进尺 1.29×10^4 m，尽管完成了超过300根工程桩，但其中近2/3是位于平均桩长较短的1#罐。如果施工措施不进行任何优化，则后续难以保障同样的完桩进度，因此对桩基施工提出了进度预警。经过对7-8月份施工数据的分析，发现原施工部署方案是3个储罐同时施工，由于机具散开铺设，尽管一定程度上能扩大作业面，但也增加了旋挖机、

混凝土泵车等大型机具的挪机次数和距离，反而增加了不必要的等待时间。

据此情况，现场及时调整施工策略，开始先后集中资源按顺序重点完成1#罐、2#罐到3#罐的桩基施工（图3），优化了成桩顺序，提高了施工速度，也为下一工序即大体积混凝土承台施工提前创造了作业面。根据旋挖总进尺统计，9月份和10月份两个重要的施工期内，桩基旋挖总进尺分别达到 1.59×10^4 m 和 2.00×10^4 m，是8月份进尺的123%和155%，完成了近600根工程桩的工作量，基本保障整个桩基工程在既定工期内的如期完成。

5 结语

大型LNG全容储罐一般工程建设周期约30-36个月，其中桩基工程作为第一道工序，既是工程质量的关键因素，也是其他工序的前置条件。某LNG接收站工程，新建3座全容储罐，为优化项目工期，桩基工程创新采用一体化成桩工艺，并结合全生命周期管理要求，制定数据采集模板，全程实时跟踪记录桩基过程控制记录，建立储罐桩基三维模型和控制参数计算模型，实现桩基工程施工数据的可视化分析。

通过数据分析及时进行风险纠偏，提出了包括护筒安放与桩位复测控制、钢筋笼顶标高控制、终孔 - 浇筑间隔时间控制、施工进度预警与效率优化措施，确保项目桩基工程实施进度在既定工期内的如期完成，质量控制达到预期要求，I类桩比率98%以上，取得良好效果。

参考文献：

- [1] 许东来, 刘滨, 张引强. 大型LNG储罐群施工优化分析[J]. 低碳世界, 2020, 10(12): 257-258.
- [2] 孙超, 邓彬, 张赵君, 等. LNG储罐灌注桩一体化成桩质量控制要点[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(04): 105-106.
- [3] 陈二松, 高军会, 范建永, 等. 桩柱一次成型在LNG储罐地基处理中的应用[J]. 工程建设与设计, 2019(15): 79-80.
- [4] 朱凯云, 张慧星. LNG储罐高承台灌注桩“一体化”施工关键技术研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(02): 118-171.
- [5] 李俊, 朱海山, 叶忠志. LNG储罐桩基施工优化及质量控制措施[J]. 石油工程建设, 2020, 46(04): 64-68.
- [6] 张宝和, 张国中, 冉庆富, 等. LNG储罐桩基施工质量控制浅析[J]. 石油化工建设, 2016, 38(03): 64-66.