

组合式塔吊基础在地下结构施工中的应用研究——以苏州中南中心项目为例

万世峰

上海静安市政工程有限公司，上海，200000；

摘要：本文以苏州中南中心超高层项目为实例，探讨了组合式塔吊基础在深大基坑及复杂地下结构施工中的适用性问题。系统分析了该基础的设计、受力机理、技术分析、施工组织方法及监测管理措施。通过分析，重点探讨了它相较于传统浅基础的几项优势：能够提前投入使用塔吊、优化现场吊装布局、更好地适应复杂地质条件，并最终提升整体施工效率。结合项目的具体实施过程，总结了组合式塔吊基础在施工管理中的关键控制要点，以及与之配套的集成化管理方法。可为类似深基坑工程的塔吊基础设计与施工提供参考。

关键词：组合式塔吊基础；地下结构施工；钢格构柱；深基坑；施工管理

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.012

引言

随着城市更新和超高层建设的发展，深基坑和大体量地下结构的施工需求不断增加。塔吊作为主要的垂直运输设备，其基础形式和安装时间直接影响项目的效率和风险控制。传统塔吊基础往往要等到底板或垫层完成后才能施工，在深基坑条件下，这会使塔吊投入时间明显滞后，进而限制土方开挖、钢筋模板安装和材料运输等关键工序，影响整体进度。组合式塔吊基础由灌注桩、格构柱和承台组成，可在土方开挖前完成施工，使塔吊提前进入现场，更适用于深基坑、软土层和场地受限的工程。本文结合苏州中南中心项目，对该体系的结构特点、施工过程和管理要点进行研究。

1 工程概况

苏州中南中心项目，场地位于苏州工业园区金鸡湖西侧。北侧紧邻运营中苏州地铁 1 号线区间隧道，西侧邻近星阳街，南侧邻近苏惠路，东侧和东南面为苏州中心。本项目占地面积 2.5 万平方米，总规划建筑面积约 50 万平方米，塔楼高度约 499 米。超高层塔楼部分地上 103 层；整体设置 6 层地下室，局部 2 层地下室。基坑总面积约 26260 平方米，其中地下六层区基坑面积 23430 平方米，地下二层区基坑面积 2830 平方米，基坑开挖深度达到 32.4 米。地下结构施工阶段，根据场地现状，使用 1#JCP6020 塔吊（安装高度 25m）和 2#FSP7020（安装高度 30m）塔吊。

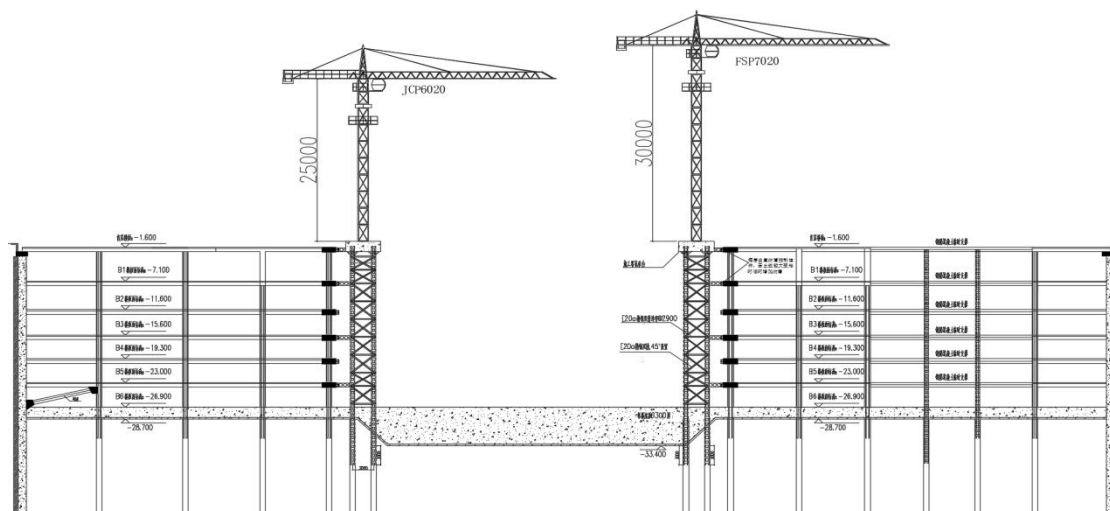
2 组合式塔吊基础设计与布置方案的技术分析

2.1 塔吊基础设计

本工程吊装任务重，塔吊均需布置于基坑范围内，为不影响工程施工进度，塔吊基础采用灌注桩+格构柱，补桩采用灌注桩+钢管柱的形式。

1#、2#塔吊设计四根钻孔灌注桩（利用 3 根原工程桩，另各补 1 根桩）作为塔吊基础的抗压桩、抗拔桩，然后在钻孔灌注桩顶附近插入格构柱或钢管柱（插入桩内 3m）。随着土方的不断开挖，钢格构柱暴露出来以后，对其进行加固，加固的方式为采用 20a 双拼槽钢设置格构柱间的水平撑和剪刀撑；同时，随地下室结构施工，将格构柱柱与裙房地下室结构进行水平拉结，水平拉结每两层设置一道，共设置 4 道（地下室 6 层结构均设置预埋件，若塔吊基础出现较大变形，可临时增加附着）。塔吊的基础埋设于混凝土承台，并采取必要的构造措施，加以固定。

1#、2#塔吊基础选用以下形式：在基础底板底标高下选用 1100 钻孔灌注桩，从基础底板至-3.100 采用 550 宽角钢格构柱，柱间槽钢加强，设置斜向和水平剪刀撑，角钢格构柱上设置混凝土承台，留出安装作业面，大小满足 100 吨汽车吊站位以及塔吊起重臂的拼装。格构柱插入灌注桩内 3000mm，格构柱的接地符合规范要求。整体结构如图一所示。



图一：塔吊基础立面示意图

2.2 塔吊基础承台设计

塔吊基础承台作为塔吊全部荷载的直接承托结构，其设计兼顾高承载力、足够刚度及安装精度要求。本工程 1#与 2#塔吊承台均采用方形大体积混凝土结构，尺寸约为 5.8 米乘 5.8 米、厚度 1.6 米，混凝土强度等级为 C35，保护层厚度 50 毫米。承台内部设置双层双向钢筋，其中主筋为直径 25 毫米、间距 120 毫米的 HRB400 钢筋，拉结筋采用直径 16 毫米、间距 240 毫米的布置，并辅以钢筋支座以保证上、下层钢筋的间距与稳定性。承台内预埋塔吊基础螺栓，分别匹配 JCP6020 与 TC7052 型塔吊，其位置通过全站仪精确放样，将螺栓中心距偏差控制在 1 毫米以内，标高偏差控制在 5 毫米以内，以确保塔吊安装后处于准确受力中心位置。承台与钢格构柱通过焊接及预埋钢板形成整体节点，使塔吊荷载能够稳定均匀地从塔身传递至承台，再由承台传递至格构柱及桩基体系，构成完整可靠的基础受力链路。

2.3 塔吊基础受力机理分析

本组合式塔吊基础的结构设计与受力分析遵循《塔式起重机混凝土基础工程技术规程》(JGJ/T187-2019)中关于格构柱式基础的相关规定^[1]。组合式塔吊基础的受力可归纳为三类：

(1) 竖向荷载（塔吊自重+吊载作用）

通过承台传递至格构柱，由灌注桩承担，形成稳定的竖向反力。

(2) 倾覆力矩

塔吊在最大幅度、最大吊载工况下，倾覆力矩可超过 8000 - 9000kN·m。格构柱将弯矩传递至桩顶，通过桩土共同作用形成抗倾覆体系。

(3) 水平荷载及风荷载

由格构柱与水平撑承担，地下结构的附着拉结进一步提高抗水平能力。

综上，组合式塔吊基础不仅满足单一方向受力需求，更通过桩基、格构柱和结构之间的协同，形成可靠的空间受力体系。

2.4 塔吊基础布置方案的技术合理性分析

组合式塔吊基础的布置方案在本工程中经过充分论证，主要从受力条件、深基坑环境和结构完整性三个方面进行考虑。首先，将塔吊放在基坑中央，是为了让力的传递路径更短、更直接。塔吊的竖向荷载和倾覆力矩可以沿近似轴心的方向传到桩基，减少偏心效应，使基础在深基坑环境中保持更稳定的受力状态，也有利于控制塔身的竖向偏移和倾覆变形。其次，“灌注桩—格构柱—承台”这一体系受力清晰，与高桩承台类似。灌注桩承担主要竖向力和抗倾覆作用，格构柱负责弯矩和水平力传递，承台把塔吊荷载有效分配到持力层。该体系能减小深基坑施工中因土体扰动带来的不均匀沉降，使基础在开挖和逆作阶段保持足够刚度。第三，格构柱穿底板的做法是基于底板完整性和拆除便利性考虑。格构柱与底板分离，不参与底板受力，可减少底板局部应力集中；塔吊拆除时只需切除露出部分，不会破坏底板本体，也避免对防水层造成二次破坏。这种构造从设计阶段就减少了渗漏风险，有助于保证底板的长期耐久性。

综上，本工程组合式塔吊基础的布置与受力分析，借鉴了高桩承台的设计理念^[1]，并结合深基坑支护体系中空间协同受力的原则^[2]，形成了适用于复杂地质条件的稳定体系。

3 组合式塔吊基础的施工技术与管理要点

3.1 施工总体部署与时序协调

组合式塔吊基础能够在基坑开挖前独立完成施工，其组织模式与依托地下室底板的传统基础形式显著不同。为实现塔吊的提前投用并确保基础在深基坑施工全过程中的稳定性，工程在施工策划阶段即形成了以“塔吊基础—基坑开挖—逆作结构施工三线并行、动态衔接”为核心的组织体系。该体系强调以桩基施工作为首要工序，在围护结构成槽及首道支撑施工期间同步推进，使塔吊基础能够在土方开挖启动前全部完成。待灌注桩达到设计强度后，钢格构柱随即插入并通过加劲板、焊缝等构造实现可靠连接，与此同时，施工团队对其临时稳定措施进行同步布置。

承台施工是塔吊基础成型的关键环节。通过精确控制钢筋绑扎、模板支设及预埋件安装的精度，提前形成了稳固的塔吊安装平台。这使得塔吊能够在主体结构施工开始前就进场安装。基坑开挖过程中，格构柱逐层暴露。为保证其稳定性，在每一层土方开挖后，施工团队立即加设水平撑和剪刀撑进行加固。此举确保了格构柱在整个暴露阶段的受力稳定。随着地下结构采用逆作法逐层向上施工，塔吊格构柱每隔两层便与结构楼板进行一次可靠拉结。通过这一过程，塔吊基础的受力体系得以从临时支撑状态，平稳过渡到与永久结构协同受力的状态。上述整体施工部署取得了显著效果。本工程塔吊较原计划提前约一个月投入使用，有效提升了土方开挖与地下结构施工的流水作业效率。

3.2 钻孔灌注桩施工质量管理

灌注桩是塔吊基础的核心承载构件，其成桩质量直接关系到塔吊在大偏心、大倾覆力矩作用下的安全。为确保桩基可靠，本工程实施了全流程的质量控制。在成孔阶段，严格将孔径偏差控制在 $+50/-20$ 毫米以内。通过实时监控钻杆垂直度和泥浆比重，成孔垂直度稳定在 $1/300$ 以内，实际平均垂直度达到 $1/420$ 。清孔后，孔底沉渣厚度均小于80毫米。这些指标均优于规范要求。

混凝土灌注时，采用坍落度为180-210毫米的C50混凝土。施工中通过控制导管埋深来保证连续灌注，埋深始终保持在2.5-6.0米之间。全过程未发生断桩或缩颈等质量缺陷。为进一步提高单桩承载力，对所有灌注桩采用了桩端与桩侧联合的后注浆工艺。注浆压力控制在0.5-1.2兆帕，每桩注浆量约为0.8-1.2立方米。注浆后，桩端阻力和桩侧摩阻力均显著提升。静载试验表明，单桩竖向承载力提高了18%-25%。最终检测结果显示，所有工程桩均达到Ⅱ类桩及以上标准，桩身完整，无缺陷。桩基完全满足了塔吊基础抗拔与抗压的安全要求。

3.3 钢格构柱施工与几何控制

钢格构柱是塔吊基础连接承台与深层桩基的重要传力构件，其施工质量尤其是几何精度直接关系塔吊的整体安全性能。在吊装阶段，格构柱插入灌注桩的深度控制在 $3000\pm 20\text{mm}$ ，通过双机抬吊、定点定位等措施使其安装偏差控制在合理范围。植入桩基后即开展焊接，通过采用E50XX系列焊条并按照二级焊缝质量标准进行施工，使焊缝超声检测覆盖率达到100%，合格率同样为100%。

格构柱在土方开挖过程中逐层暴露，其稳定性十分关键。施工团队采用“吊装复测—焊接复测—随挖复测”的多级校核方法严格控制垂直度。吊装完成时，垂直度控制在 $1/400$ 以内；焊接完成后复测达到 $1/500$ 。基坑开挖至底板阶段，格构柱整体倾斜量控制在 $8\text{mm}/10\text{m}$ 以内，实测平均偏移不超过6mm，远低于安全警戒值。开挖过程中，通过随挖随加固布置水平撑和剪刀撑，保证格构柱在整个暴露期的稳定性。施工组织合理，本工程未发生机械碰撞格构柱的情况，有效避免了潜在几何偏移风险。

3.4 承台施工与塔吊安装界面管理

承台不仅是塔吊荷载向格构柱传递的重要结构单元，也是塔吊安装的直接载体，因此其施工质量对塔吊安装精度与运行安全具有决定性影响。本工程承台尺寸为 $5.8\text{m}\times 5.8\text{m}\times 1.60\text{m}$ ，采用双层双向钢筋布置，钢筋保护层厚度控制在 $50\pm 5\text{mm}$ 范围内，混凝土浇筑坍落度控制在 $160-200\text{mm}$ ，以保证混凝土振捣密实性和整体刚度。承台施工完成后，通过7天龄期强度检测，混凝土强度达到设计值的65%，并在28天龄期强度达到设计要求后才具备塔吊安装条件。

塔吊预埋件对安装精度的要求极高，为此工程采用双组独立测量复核制度，通过全站仪测量将螺栓中心距偏差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 内，标高偏差控制在5mm以内。为确保塔吊安装设备的安全稳定，施工区设置了承载力不低于 150kPa 的汽车吊站位平台，并布设钢板加强带保证安装设备的局部承载能力。在塔吊正式安装前，对承台沉降、格构柱偏移及埋件位置进行全面复测，确保基础结构进入稳定状态，最终实现了承台施工与塔吊安装的无缝衔接。

3.5 监测及安全管理体系

深基坑工程中，系统的监测是识别风险、保障安全的关键环节[3]。为保证塔吊基础在深基坑施工全周期的稳定，本工程建立了完整的监测体系。体系包括沉降监

测、偏移监测、水平位移监测和运行状态监测。监测点覆盖承台、格构柱中上部及塔吊塔身关键节点，并随施工进度调整监测频率。承台沉降在常规阶段每月监测 2 次，开挖阶段增加至每周 1 次。沉降报警值为 20mm，实际最大沉降仅 6.7mm。格构柱垂直度偏移常规每周监测一次，开挖阶段每日监测一次，报警值为塔身高度的 0.4%，实际最大偏移 0.13%，远低于警戒值。塔吊运行时，安装自动化振动和水平力监测设备，实时采集塔身受 力状态，全周期未出现超限情况。

施工团队基于监测数据建立即时分析机制。一旦数据异常，立即启动应急响应，包括暂停塔吊作业、加固格构柱支撑、复核桩基沉降及桩身完整性。监测体系、报警机制和应急措施协同作用，使塔吊基础在地下结构施工全过程中保持稳定、安全。

4 组合式塔吊基础在地下结构施工中的优点

4.1 可提前安装塔吊，整体施工速度更快

组合式塔吊基础可在土方开挖前完成，不必等待底板或地下结构成型，使塔吊能提前约一个月投入使用。塔吊提前后，土方外运、钢筋笼吊装、模板周转等工序可同步展开，现场不再因塔吊滞后而停工。施工流程更连贯，关键工序被压缩，整体工期明显缩短，尤其适用于深基坑和逆作法等工况。

4.2 布置更灵活，塔吊覆盖范围更大

组合式塔吊基础不再依赖底板，可直接设置在基坑中央。中央布置的优势很明显：塔吊回转半径能充分发挥，覆盖面积比边缘布置扩大约 30%，现场大部分材料都能在 一次吊运中到位，不再需要分区倒运。塔身无需加长附墙，结构约束也更小。由于吊运距离缩短，材料周转更快，机械等候减少，现场组织更加顺畅。对于地下结构钢筋密集、构件繁多的工程，覆盖面提升带来的效率增益尤为明显。

4.3 深桩支撑+格构柱体系，整体安全性更高

组合式塔吊基础采用“深桩承载+格构柱传力”的结构体系，受力关系清晰，工作方式与高桩承台类似，安全性明显高于软弱地层中的浅基础。灌注桩穿过软弱层进入持力层，竖向承载可靠；格构柱插入桩内 3 米，通过焊接和加劲形成稳固连接。在基坑开挖过程中，同步设置水平撑和剪刀撑，分层保护格构柱的侧向稳定；地下结构施工后，格构柱再与楼板拉结，实现从临时支撑到永久结构的过渡。该体系在施工全过程中保持稳定，整体安全性显著高于传统塔吊基础形式。

4.4 综合成本更低，整体经济效益明显

组合式塔吊基础在本工程中不仅提高了施工效率，也带来了实质性的成本节约。项目充分利用原有工程桩，只在必要位置补桩，减少了新桩投入，节约费用约 30 万元。格构柱采用钢结构，可在塔吊拆除后回收，经检测与简单处理后还能再次使用，可再节约约 20 万元。塔吊提前投入后，地下结构整体施工节奏被压缩，本工程较原计划提前约 30 天完成地下结构，对大型综合体项目来说，这一时间收益价值较高。总体来看，组合式基础的经济效益来自多项因素的叠加，而不是单一来源。

4.5 减少地下室渗漏点，质量效果更好

地下室底板最常见的质量问题就是渗漏。传统塔吊基础通常与底板连在一起，塔吊拆除后需要大面积凿除和补强，不仅破坏原有防水层，也难以完全恢复，渗漏风险很高。本工程采用格构柱穿出底板的做法，避免了这一问题。塔吊拆除时，只需在底板上方将格构柱切断，不会损伤底板本体，防水层保持连续完整，从源头减少渗漏隐患。对于深基坑这种对防水要求严苛的工程，这一改进意义突出。现场情况也证明，塔吊位置的底板渗漏风险明显降低，质量更稳定可控。

5 结论

综上，组合式塔吊基础在深基坑及大型地下结构施工中表现出较为稳定的应用效果。其可在开挖前完成施工，塔吊可提前投入使用，有利于提升整体施工进度。中央布置扩大了吊装覆盖范围，减少材料倒运，现场组织效率得到明显改善。深桩与格构柱形成的受力体系在软弱地层中稳定性较好，能够满足不同工况下的安全要求。配套的监测措施也使基础在开挖及逆作阶段始终保持在可控范围内。总体来看，该基础形式具备一定的经济性和可推广性。若后续结合 BIM 与实时监测技术，其在复杂工程环境中的应用价值仍有进一步提升空间。

参考文献

- [1] 赵志缙，应惠清. 建筑施工（第 6 版）[M]. 上海：同济大学出版社，2020:280-295.
- [2] 刘国彬，王卫东. 基坑工程手册（第二版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2009:415-430.
- [3] 张明聚，郭红兵. 深基坑工程[M]. 北京：机械工业出版社，2020:212-225.

作者简介：万世峰，男，汉族，安徽人，本科，职称：工程师，研究方向：建筑施工项目管理与技术。