

超高层综合体基坑围护及栈桥板施工技术与管理研究

姜勇

上海隆科兴非开挖工程有限公司, 上海 200126

DOI:10.61369/ETQM.2026060015

摘 要 : 文章以杭州某超高层城市综合体深基坑工程为实践对象,从超深、大体积基坑围护及栈桥板施工技术及管理创新入手进行研究。研究重点放在邻近地铁的复合围护结构施工、多道支撑与栈桥一体化协同、承压水综合治理这些核心问题上,创建起“刚性挡墙+严密止水+分区限时+实时反馈”的变形控制体系以及“疏干—减压—回灌—应急”的地下水协同控制模式。从施工管理角度出发,首次提出多类围护结构接驳节点质量控制、支撑和栈桥精度进度同步、钢栈桥动态荷载控制等管理手段。项目实践证明技术及管理措施是有效的,给同类型超高层综合体深基坑工程提供了一个可以复制的技术管理范式。

关 键 词 : 超高层综合体; 基坑围护; 栈桥板施工; 技术与管理

Research on Construction Technology and Management of Foundation Pit Enclosure and Trestle Slab for Super High-rise Complex

Jiang Yong

Shanghai Longkexing Trenchless Engineering Co., Ltd., Shanghai 200126

Abstract : This paper takes the deep foundation pit project of a super high-rise urban complex in Hangzhou as a practical case, conducting research from the perspective of construction technology and management innovation for ultra-deep, large-volume foundation pit enclosures and trestle slabs. The study focuses on core issues such as the construction of composite enclosure structures adjacent to subways, the integrated coordination of multiple supports and trestles, and the comprehensive management of confined water. It establishes a deformation control system characterized by "rigid retaining walls + tight waterproofing + zoned time limits + real-time feedback," as well as a coordinated groundwater control model featuring "drainage—decompression—recharge—emergency response." From the perspective of construction management, this paper proposes, for the first time, management methods such as quality control for connection nodes of various enclosure structures, synchronized precision and progress of supports and trestles, and dynamic load control for steel trestles. Project practice has demonstrated the effectiveness of these technical and management measures, providing a replicable technical management paradigm for deep foundation pit projects of similar super high-rise complexes.

Keywords : super high-rise complex; foundation pit enclosure; trestle slab construction; technology and management

引言

随着城市化的推进,超高层综合体向地下空间发展是不可避免的,但是深基坑工程所遇到的技术难题也越来越明显。尤其在城市核心区,基坑施工常常要临近已有的地铁隧道、密集的市政管线以及老旧建筑,对于变形控制、地下水治理以及施工组织都提出了很高的要求。

一、超高层综合体基坑特点及周边环境分析

超高层综合体基坑技术复杂、施工难度大,主要表现在三个方面。开挖深度大,一般20米以上、30米以上甚至更大,要承受较大的土压力、水压力,对围护结构的承载能力和稳定性要求高。二是基坑规模大,平面形状大多为不规则多边形,支护体系

跨度大,受力复杂,整体协同受力要求严格。三是施工周期长,需要土方开挖、支护施工、栈桥板搭建等多道工序,容易受到地质条件和环境因素的影响。

从周边环境来讲,超高层综合体大多选在城市中心地段,周边环境十分繁杂。一方面由于临近已有建(构)筑物密集,部分建筑物年代久远,基础形式复杂多样,基坑施工所造成的变形很

容易引起周围建筑沉降、开裂等危险。另外周边市政管线众多，有给排水、燃气、电力、通信等各种管线，对基坑施工的位移控制精度要求很高。另外，核心区域交通流量大，施工场地受空间限制，施工效率和周边交通疏导、环境降噪等要求都要考虑进去，施工难度和安全风险都增大了。

二、项目概况

杭州超高层城市综合体工程为四层地下室。基坑面积137550 m²，普遍开挖深度14.0 ~ 14.9m，局部坑中坑最大深度达21.4m，安全等级一级。基坑分A1、A2、B1、B2四个区进行顺作施工，支护体系为地下连续墙、钻孔灌注桩加TRD或三轴搅拌桩止水帷幕，设三道钢筋混凝土内支撑。为了保证土方和材料的运输，在基坑内设大跨度钢栈桥。工程紧挨着运营的地铁7号线，因此对于变形控制和施工组织的要求非常高。

三、基坑围护与栈桥板施工技术

（一）邻近运营地铁的复合式围护结构施工技术

在靠近运营地铁隧道的超深基坑工程中，为了达到高挡土刚度和严密止水的目的，常常采用地下连续墙、TRD等厚度水泥土搅拌墙和钻孔灌注桩组成的复合围护结构。地下连续墙是主要受力结构，深度要穿过承压含水层，墙体厚度一般不小于800mm，成槽垂直度 $\leq 1/300$ 。TRD工法墙适合狭长区域，用三循环成墙工艺形成连续等厚的水泥土墙，深度可达20m以上，水泥掺量不小于25%，能有效地阻隔地下水渗流路径。钻孔灌注桩排桩用在非敏感区，与三轴搅拌桩止水帷幕配合使用。施工时一般采用跳打、跳槽顺序来减小群桩效应造成的附加变形。围护桩与止水帷幕之间留有空隙，用压密注浆填满，使整个防渗封闭，保证基坑变形在地铁保护范围内。

（二）超深基坑多道混凝土内支撑体系施工与换撑技术

对于开挖深度大于14m的超深基坑，一般会设置两到三道钢筋混凝土水平内支撑来控制围护结构变形。支撑体系按分层开挖、限时支撑的原则进行，每层土方开挖完毕后立即组织支撑梁、围檩模板安装、钢筋绑扎和混凝土浇筑，在规定时间内形成闭合受力体系。支撑构件尺寸按受力要求来定，混凝土强度等级不小于C30。换撑阶段，地下室结构楼板达到设计强度后，用预埋传力钢板、型钢牛腿或者混凝土传力带把支撑反力平稳转移到主体结构上，然后用静力切割的方式分段拆除内支撑。该技术可以很好地防止支撑拆除时围护体系的突然受力变化，保证深基坑后期施工的安全性、稳定性。

（三）大跨度重型钢栈桥的安装与使用维护技术

为了满足超深基坑内大量土方外运和材料吊运的需要，一般设置大跨度重型钢栈桥作临时运输通道。栈桥主结构大多使用H型钢梁（H244×252×11×11），上铺6mm厚防滑花纹钢板，单跨长度可达几十米，设计荷载要考虑到土车辆荷载（一般取35kPa）。安装时用大型履带吊或塔吊进行分段吊装，栈桥梁端和

下部格构柱顶用焊接或者高强螺栓可靠连接，保证整体稳定。施工时对栈桥坡度、平整度和节点连接质量进行严格的控制。使用时严禁在栈桥及其周围15m范围内超载堆放土方，定期对结构变形、焊缝情况、支座沉降进行检查。雨季加强排水工作，防止积水腐蚀钢结构，保证栈桥在基坑施工期间的安全使用。

（四）承压水控制与坑内外协同降水施工技术

对于存在深厚承压含水层的场地，超深基坑开挖容易造成坑底突涌，必须进行系统的降水控制。一般采用“坑内疏干、重点减压、坑外应急回灌”三者结合的方式。在坑内设置自流深井疏干浅层潜水。在深坑周边设置深井（井管用DN273壁厚12mm钢管），针对主要承压层的承压水头进行降低。在坑外靠近敏感建筑物或者管线的地方设置兼作回灌井的观测井，构成水位调控网络。降水提前10 ~ 14天开始，成井采用正循环钻进，滤管外加多层滤网，洗井用活塞和空压机联合工艺。施工全过程动态监测水位变化，根据抗突涌验算结果（安全系数 ≥ 1.10 ）及时调节各井抽水量，在保证基坑稳定的基础上，尽可能减小对周围环境水位的影响。

四、施工管理

（一）TRD等厚度水泥土搅拌墙与地下连续墙接驳节点的质量控制管理

TRD墙和地下连续墙的接驳节点是止水体系的关键薄弱环节，质量好坏直接影响到基坑整体防渗的效果。施工前应准确放样，保证TRD墙体中心线与地连墙外缘预留搭接宽度。TRD施工到转角或者与地连墙交接处的时候，采用拔箱后退、复打搭接的方式，在末端区域延长成墙长度并重复搅拌，保证水泥土充分咬合。地连墙导墙施工时应预埋定位钢板或者设置导向架，控制成槽位置偏差 $\leq 20\text{mm}$ ，防止与TRD墙体错位。接驳区域不得有施工冷缝，TRD成墙后48小时之内必须开挖相邻地连墙槽段，防止土体扰动。施工期间安排专人全程旁站，对TRD垂直度（ $\leq 1/250$ ）、水泥浆液比重、提升速度、地连墙成槽垂直度进行重点控制，保证两类工法在空间上无缝对接、力学上相互配合、防渗上连续封闭。

（二）钻孔灌注桩围护与止水帷幕同步施工的工序衔接管理

钻孔灌注桩排桩和三轴水泥土搅拌桩止水帷幕一般采用“桩—墙—注浆”一体化施工方式，工序衔接好坏直接关系到支护的整体性和工期。管理上采用分区流水、跳打同步的办法。先做外围三轴搅拌桩止水帷幕，形成封闭隔水圈。然后采用跳3打1法进行钻孔灌注桩施工，防止邻桩施工时扰动未凝固的水泥土。围护桩和止水帷幕之间的间隙一般为300 ~ 500mm，及时用压密注浆填充，注浆应在围护桩混凝土初凝后、终凝前完成，保证浆液能有效渗透。施工计划要与两种设备作业面相吻合，防止互相干扰。召开工序协调会，及时对桩机、搅拌桩机的行进路线进行调整。利用BIM模型对施工顺序进行预演，提前发现冲突点，使支护体系整体刚度和止水可靠地完成。

（三）多道钢筋混凝土支撑与钢栈桥一体化施工的精度与进度协同管理

钢筋混凝土支撑和钢栈桥在空间上交叉共存，要统筹结构受

力、施工通行和吊装作业，实行一体化协同管理。首先，在支撑设计阶段就将栈桥立柱的位置进行整合，把栈桥格构柱兼作支撑立柱，减少地下障碍。施工时用支撑先行、栈桥嵌入的原则。第一道支撑（压顶梁）和栈桥主梁同时施工，用支撑梁做为栈桥端部的支座。后续支撑围檩标高应避开栈桥下弦，留有足够的净空。精度控制上用全站仪对支撑轴线、栈桥支座预埋件做三维坐标复核，偏差控制在±10mm之内。进度上将支撑混凝土浇筑、养护周期和栈桥板吊装计划结合起来编制，保证支撑达到80%设计强度后再允许重型车辆通行。采用周滚动计划和日作业令制度，使模板、钢筋、混凝土、钢结构吊装班组之间无缝对接，保证深基坑内支撑受力安全和运输通道畅通两个目标的实现。

（四）钢栈桥板在超深基坑环境下的吊装定位、焊接及荷载动态管控

钢栈桥板在超深基坑内吊装遇到空间受限、风荷载影响大、定位精度要求高等难题。吊装前对格构柱顶预埋件标高、平整度进行复测，偏差超过规定值时用楔形钢板调平。使用履带吊或者塔吊分块吊装，每块板就位后立即用临时螺栓固定，然后进行周边满焊，焊缝质量按二级标准验收。焊接作业应避免在大风、雨天进行，以免高空坠落及焊接缺陷。荷载管理上确定栈桥的设计活载一般不大于35kPa，不得超载堆土或者集中停放重型机械。在栈桥关键跨处设沉降观测点，每周做一次挠度观测。建立使用、检查、限载的动态机制，出土高峰期安排专人疏导交通，雨

后检查排水沟是否畅通，发现异常变形立即限载并组织评估，保证栈桥在整个基坑施工周期内安全使用。

五、项目难点及对策

（一）超深基坑与邻近地铁隧道的变形协同控制

本工程基坑普遍深度为14.9m，局部深坑达到21.4m，西北侧紧邻已经运营的杭州地铁7号线兴议站和区间隧道，围护结构距离车站主体最近处只有11.4m。超深开挖引起的土体卸荷很容易造成围护体系向坑内位移，进而引起地铁隧道沉降或者水平变形，危及运营安全，变形控制标准十分严格。

就这个问题而言，项目采取了刚性挡墙加严密止水、分区限时、实时反馈的综合措施。在地铁影响区（A1、A2区）采用800mm厚地下连续墙加TRD等厚度水泥搅拌墙的复合围护体系，给挡土提供高刚度和全封闭止水。严格实行先A区后B区施工顺序，A区先完成至-1F顶板形成水平支撑，再开挖B区，减小地铁侧土体连续扰动。土方开挖按照分层、分块、对称、平衡的原则进行，每层开挖后24小时之内完成支撑闭合。同步布置自动化监测点，对地铁隧道位移、围护桩顶水平位移、支撑轴力等实施高频采集，数据实时上传预警平台，当接近预警值时立即启动应急预案（坑外回灌、坑内堆载反压），从而达到变形全过程精准控制的目的。

表1 自动化监测关键指标数据统计表

监测项目	控制允许值	预警阈值	实际监测最大值
地铁隧道竖向沉降	≤10mm	8mm	6.2mm
地铁隧道水平位移	≤8mm	6.4mm	4.8mm
围护桩顶水平位移（地铁影响区）	≤30mm	24mm	18.5mm
核心区支撑轴力	≤5000kN	4000kN	3520kN

（二）复杂地质条件下的地下水综合治理

项目场地有深厚承压含水层，初始承压水头埋深约为5.4m。基坑最大开挖深度达到21.4m，远远小于承压含水层顶板，造成坑底上覆土压力不足，存在严重的突涌风险。同时东侧临近住宅小区，过度降水容易造成周边地表沉降，地下水控制既要保证基坑稳定又要保护环境，技术难度大。

项目采取“疏干、减压、回灌、应急”四个环节相配合的协同降水方案。坑内布置81口自流深井疏干浅层潜水，保证开挖面干燥，在主楼深坑周围设置16口深达-45.7m的承压水降水井，通过抗突涌验算确定各个区域所需要的降深，准确控制水位。坑外东侧布置13口兼做回灌井的观测井，北、南、西各设15口应急井，构成内外联动水位调节网络。降水提前14天开始，用GPS-10钻机成井，滤管外包多层滤网，活塞空压机联合洗井，出水含砂率≤1/1000。施工全过程对坑内外水位进行动态监测，根据实时数据自动调节各个井的抽水量，在保证基坑抗突涌安全系数大于等于1.10的前提下，使周边水位降深控制在允许范围内，有效地保护了周围建构筑物。

（三）大跨度重型钢栈桥在超深基坑环境下的结构稳定

本工程基坑面积大、深达14m以上，要设大跨度重型钢栈桥

为运输主干道。栈桥板单跨长、荷载大，长期在深基坑高湿、高荷载、频繁通行的环境下工作。支座沉降、结构疲劳、焊接节点开裂、整体失稳风险大，在支撑拆除、暴雨积水等情况下安全控制难度大。

项目在设计、安装和运维的全过程里，对栈桥做了安全措施的强化工作。设计阶段把栈桥格构柱与支撑立柱统一起来，从而提升整体的稳定情况。明确栈桥区域不得有15m范围内堆载，设置200×300mm挡水墙防止雨水倒灌。安装时用全站仪定位支座，偏差≤10mm，焊缝按二级标准100%检查。使用阶段创建起“专人巡查、定时检测、动态限载”的机制。每天安排专人对栈桥挠度、焊缝、支座、排水情况进行检查。出土高峰期限制车速、间距，雨后立即排水。在重要的跨中布置沉降观测点，数据异常时立即限载，并进行结构的评定。另外，在支撑拆除期间停止了栈桥的使用，待换撑完毕、结构稳定后才恢复通行，保证整个22万方土方开挖和主体施工期间栈桥的安全可靠运行。

六、经验总结

在参与杭州某超高层综合体基坑工程施工管理的过程中，对

复杂深基坑的控制有了更深的认识。复杂环境下工程推进不是单个技术叠加，而应该使每一个方案都能立足现场实际情况。地质勘察的细微数据、周边敏感设施的安全阈值，都是技术选型的重要依据，只有经过反复论证优化，才能使措施真正适应工况、规避风险。高效的施工需要“柔性协同”，静态的计划不能适应现场的变化，只有通过数字化工具梳理工序逻辑，用实时监测的数据动态调节参数，才能使精度和进度形成良性互动，避免各个环节之间的脱节内耗。安全管控的核心就是把风险想在前面、落在实处，对高危环节的专项防控不能停留在表面，全流程的隐患闭环管理才是底线，只有这样才能够守住工程安全的生命线。

七、结束语

超高层综合体深基坑工程是城市地下空间开发的典型代表，它的施工同项目的成败息息相关，而且还会牵涉到城市基础设施的安全以及公共利益。本项目实践表明，在复杂的城市环境里，单靠一种技术手段很难应对各种风险，必须创建起包含设计改良、施工监管、监测回馈以及应急反应的全部链条管理架构。由于BIM、物联网、智能监测等技术的大量使用，深基坑施工越来越精确、越来越智能、越来越安全。

参考文献

[1]凌志，徐展，郑爱荣，等. 施工流程对深基坑支撑体系中栈桥板应力的影响研究 [J].天津城建大学学报,2025,31(04):251-261.

[2]金和卯，王卫，周裕桂，等. 超20m深基坑换撑设计与拆换撑施工技术 [J].施工技术(中英文),2025,54(16):73-78.

[3]薛云龙，冷正华，宋理志，等.轻量化可周转式钢栈桥施工技术在深基坑工程中的应用 [C]//《施工技术（中英文）》杂志社，亚太建设科技信息研究院有限公司.2025年全国工程建设行业施工技术交流会论文集（中册）.中建三局集团有限公司,2025:274-277.

[4]谢晓波，郭子琦，李靓，等. 联合结构深基坑开挖施工技术 [J].科技创新与应用,2024,14(33):161-164.

[5]王连铎. 装配式钢栈桥板在基坑工程中的应用 [J].建筑技术,2024,55(11):1390-1394.