

DOI: 10.7672/sgjs2026130117

# 复杂基坑内支撑施工与拆除变形控制技术研究\*

白亦泽,焦守业,蒋 洋,纪茗远,祝爱明,任 皓

(中国建筑第四工程局有限公司,广东 广州 510000)

**[摘要]** 针对复杂环境下深基坑内支撑施工与拆除的变形控制难题,以杭州某深大基坑工程为例,采用有限元软件建立三维整体计算模型,分析施工及拆除方案对基坑稳定性的影响。通过盆式挖土、分区域施工与拆除、控制栈桥荷载及绳锯切割等技术措施,优化了内支撑施工与拆除顺序。结果表明,采用分区对称拆除方法能有效控制基坑变形,监测数据表明,各项指标均在设计允许范围内,确保了基坑及周边环境的安全。

**[关键词]** 深基坑;内支撑;拆除;变形;有限元分析

**[中图分类号]** TU753

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)13-0117-05

## Research on Deformation Control Technology for Support Construction and Demolition in Complex Foundation Excavation

BAI Yize, JIAO Shouye, JIANG Yang, JI Mingyuan, ZHU Aiming, REN Hao

(China Construction Fourth Engineering Bureau Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

**Abstract:** To address the challenge of deformation control during the installation and demolition of internal support in deep foundation excavation under complex conditions, this paper uses a large-scale deep foundation excavation project in the city of Hangzhou as a case study. A three-dimensional integrated computational model was established using finite element software to analyze the impact of construction and demolition plans on excavation stability. The sequence of internal support installation and demolition was optimized through technical measures such as basin-type excavation, zone-by-zone construction and demolition, control of trestle loads, and wire saw cutting. The results indicate that the zone-by-zone symmetrical demolition method effectively controls foundation excavation deformation. Monitoring data show that all indicators remain within the design-allowed limits, ensuring the safety of the foundation excavation and the surrounding environment.

**Keywords:** deep foundation excavation; internal supports; demolition; deformation; finite element analysis

### 0 引言

在工程地质条件、水文条件和周边环境复杂的区域,对于深大基坑,基坑支护工程的设计和施工难度增大。基坑工程也由早期简单的支护形式,向着更复杂的排桩体系、内支撑体系、拉锚体系以及地下连续墙等结构体系发展<sup>[1-2]</sup>。同时,基坑工程相对于主体结构安全性较低,加上土体的性质复杂、区域性强,受周边环境影响不确定因素多,一旦失效,轻则造成房屋开裂、道路塌陷,重则造成人员伤亡和周边建筑物倒塌<sup>[3]</sup>。

通过研究基坑内支撑施工、拆除技术要点,利用地勘报告及受力分析软件,分析基坑支护结构数值信息,分析不同施工方案对基坑受力的影响,规划出重点监测区域,并结合实际施工情况,对基坑工程的施工难点和技术措施进行探讨,旨在为类似工程提供参考。

### 1 工程概况

#### 1.1 项目概况

国家(杭州)短视频基地总建筑面积 184 728m<sup>2</sup>,其中地上建筑面积 123 348m<sup>2</sup>,地下建筑面积 61 380m<sup>2</sup>(见图 1)。工程由 3 栋高层办公楼、裙房和地下室组成,地上 A1 塔楼为 22 层建筑,檐高为 99.3m,结构体系为钢框架-混凝土核心筒结构;A2 塔楼为 13 层办公建筑,檐高为 55.3m,结构

\* 中建四局科技研发课题(CSCEC4B-2025-KTB-32)

**[作者简介]** 白亦泽,工程师,国家一级注册建造师, E-mail: 552493467@qq.com

**[收稿日期]** 2026-01-04

体系为钢框架结构;B 塔楼为 14 层办公建筑,檐高为 61.5m,结构体系为框剪结构。地下分为 3 层地下室,结构体系为框剪结构。



图 1 工程效果

Fig. 1 Engineering renderings

1.2 施工场地环境

本工程位于杭州市上城区望江街道鲲鹏路与望潮路交叉口东南角,处于钱塘江平原区域,钱塘江为冲积平原,地质条件较为复杂,地下水位较高,土质主要为淤泥质黏土、粉质黏土和砂质黏土,易出现流土、坍塌等现象,尤其对于场地狭小的深基坑支撑拆除过程中,存在较多不稳定因素,因此分析支撑、拆除的受力,选择针对性的施工和拆除方式与顺序,确保安全施工,且不行影响周边环境非常重要。基坑开挖施工影响范围较广,基坑周边高层建筑及地下管线较多,施工环境十分复杂,保证本工程深基坑和周边高层建筑物安全是重点。

2 深基坑内支撑施工与拆除

2.1 内支撑施工

本工程基坑面积较大,基坑边长较长,钢筋混凝土水平内支撑系统共 3 道,长度长且体量大,平面布置形式分为对撑、角撑加边桁架。采取分段浇筑或微膨胀混凝土等措施控制超长内支撑早期混凝土收缩。内支撑施工、栈桥板施加荷载和内支撑拆除过程中内力剧变和基坑变形控制是本工程施工的重难点。内支撑施工及拆除难度大、周期长,如何合理选择内支撑施工及拆除的顺序和方法,直接决定了本工程地下室结构甚至整体的施工进度。对此,施工单位对内支撑系统进行详细受力分析,采取分区域施工、深化设计和拆除,合理进行施工部署。基坑支护剖面如图 2 所示。

2.2 内支撑施工方法

建立有限元模型,分析基坑内支撑不同拆除方案对基坑稳定性的影响,利用有限元软件对基坑内支撑拆除进行全过程施工模拟,充分考虑基坑边界效应和周边建筑情况。计算中,基坑围护系统及周边土体作为边界条件,按不同施工方案进行分区域施工模拟,区域内支撑梁作为单元模拟,在有限元软件中,分阶段对内支撑梁进行删减并分析监测点

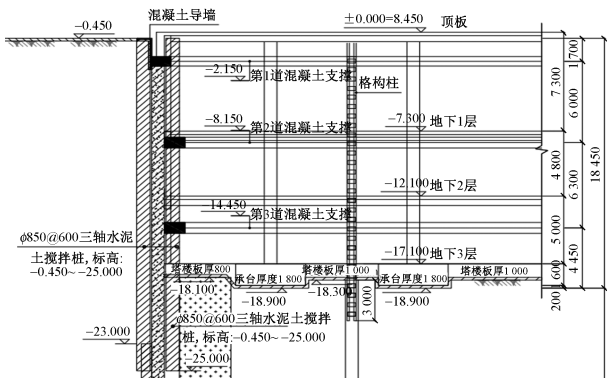


图 2 基坑支护剖面

Fig. 2 Profile of foundation excavation support

受力。

本工程采用盆式挖土, I 期基坑内土方开挖至第 1 道混凝土内支撑底标高,浇筑 I 期第 1 道混凝土压顶梁和内支撑;第 1 道内支撑全部形成并达到设计强度的 80%后, I 期基坑内土方向下分区、分块、分层开挖至第 2 道内支撑标高,施工第 2 道混凝土腰梁和内支撑;第 3 道内支撑全部形成并达到设计强度的 80%后, I 期基坑内土方向下分区、分块、分层开挖至基底位置,进行工程桩桩头破除,浇筑垫层、基础底板及周边换撑板带;此方法不需要一次性完成全部开挖,施工进度快,有利于缩短工期,最大限度减少基坑侧壁的挤土压力,降低土体失稳的风险,提高施工安全性,噪声较小,对周边环境影

响较小,降低对基坑工程施工的整体影响<sup>[4]</sup>。分区域施工平面如图 3 所示,内支撑施工顺序:①→②→③→④→⑤→⑥→⑦。

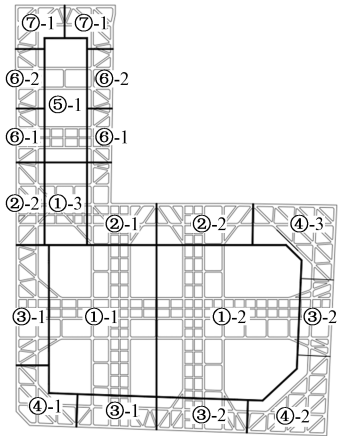


图 3 分区域施工平面

Fig. 3 Sub-regional construction plan

2.3 大型车辆行车路线

考虑本工程周边环境以及水平内支撑体系受力的特点和挖土总体原则,土方开挖前施工单位应编制详细土方开挖的施工组织设计,并在取得基坑

围护设计单位认可后方可实施。施工组织设计需考虑现场施工车辆行车路线,由于场地狭窄,考虑在内支撑中增加栈桥板,以保证运输道路畅通。根据建立的内支撑有限元模型计算得出(见图4),荷载为现场施工机械及材料堆场质量的1.2倍,栈桥区域堆载不超过20kPa,施工时严格控制上栈桥车辆荷载不得超过50t,安排专人检查巡视,发现问题及时处理。设立严密的监测控制点,密切监测周边建筑、道路、内支撑及管线的变化状态,做好监测记录,并制定相应的应急处理措施。进入栈桥车道上的车辆或机械应控制运行速度,严禁超载。

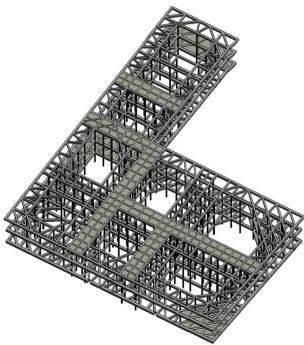


图 4 内支撑模型  
Fig. 4 Internal support model

2.4 混凝土内支撑结构拆除施工方法

2.4.1 混凝土内支撑拆除方案

本工程基坑深度约19m,钢筋混凝土内支撑人工剔凿难度大。如果直接爆破拆除会导致内支撑内力瞬间释放,对基坑围护和周边环境造成较大影响,且人工剔凿效率低下,无法满足工期要求。选择合适的内支撑拆除方法,在保证拆撑过程中基坑及结构安全前提下,既满足内支撑拆除进度要求,又能节约施工费用是难点。

考虑到本工程工期紧,拆撑处于关键线路上,经过成本和技术分析对比,利用绳锯切割机进行机械切割既能有效控制拆除风险,又能提高工作效率,并兼顾成本控制,确保工程按计划顺利推进。

2.4.2 混凝土内支撑拆除

内支撑拆除顺序根据围护支撑体系的设置、支撑及联系杆件的拆除分区进行,当拆撑条件具备时开始对内支撑进行拆除。支撑拆除遵循“先次要构件、后主要构件,先撑后拆、后撑先拆、主撑后拆”的原则,采用搭设支撑架配合人工风镐+绳锯切割机进行机械切割,先拆连杆、八角撑,然后对称拆除主撑,最后分段拆除腰梁<sup>[5]</sup>。

1)根据所拆除部位内支撑梁的截面面积和吊

装设备的起重能力,对内支撑梁进行划线定位,确定切割单元大小和质量,并在混凝土内支撑上用红色油漆将切割处明确标出,划线定位前必须经过计算,防止切割单元过长过重导致无法吊运。

2)基础底板换撑施工完成后且基础底板达到设计强度的80%后,拆除第3道混凝土内支撑,浇筑地下2层梁板,并在结构缺失区域设置临时内支撑构件。

3)待地下2层结构梁板达到设计强度的80%后,拆除第2道混凝土内支撑,浇筑地下1层梁板,并在结构缺失区域设置临时换撑构件(见图5)。

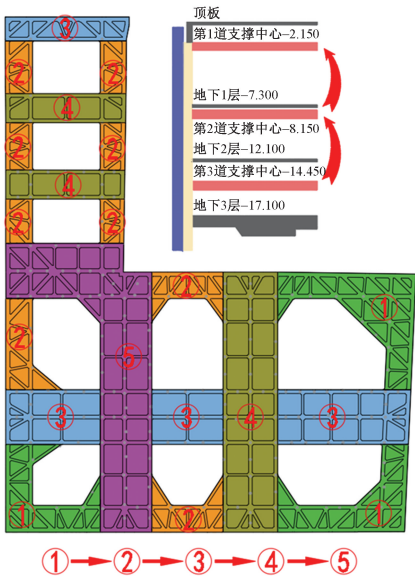


图 5 第2,3道支撑拆撑顺序  
Fig. 5 Sequence of the second and third support removal

4)待地下1层结构梁板达到设计强度的80%后,拆除首道混凝土内支撑。首道内支撑根据施工中对栈桥的需求分2次进行拆除(见图6)。

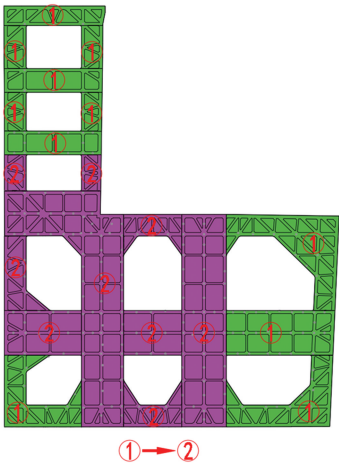


图 6 首道支撑拆撑顺序  
Fig. 6 Sequence of initial support removal

3 内支撑施工受力模拟分析

3.1 力学分析方法

建立初始阶段有限元模型,包括栈桥的主体结构构件和连接构件。统计栈桥在实际施工过程中所受荷载的种类,包括自重荷载、行走荷载、施工荷载等。在此基础上甄别对栈桥结构影响最大的主要荷载。通过有限元计算,得出栈桥在不同荷载情况下的受力情况和变形情况,通过结果分析,进一步确定栈桥的最不利位置和极限荷载<sup>[6]</sup>。

3.2 边界条件

1)施工边界条件设置:建立整个支护结构模型后,施加土压力,模拟在静止土压力作用下的整体结构受力,并将初始位移置零处理,作为内支撑施工验算的起点。

2)拆撑边界条件设置:因地下 4 层拆撑区域的基础底板和地下 3 层的顶板已经全部施工完毕,故设定拆撑期间底板和顶板为固定端,地下 3 层顶板可考虑为整板结构,约束  $x,y$  方向的位移,仅保留竖向自由度。将拆撑结构设置  $x,y,z$  方向自由度,并将初始位移置零处理,即拆撑施工验算的起点。

3.3 内支撑结构施工力学分析

随着基坑开挖和支撑梁数量的增加,位于土方开挖区的深基坑支护桩(墙)的内力增加,偏于不安全,基坑危险性增大,而其余支护桩的安全性能受影响很小,随着基坑不断开挖,第 1 道内支撑的内力变化很大,靠近开挖区下部支撑内力小幅增加,而下部支撑不施工或者晚施工都会导致上部支撑内力大幅增加。

在内支撑体系深化设计时,考虑下部支撑的内力放大 1.2~1.5 倍,上部支撑内力放大 2~4 倍来进行构件设计。此外,施工时应加强监测,防止内支撑脱落。

3.4 施加机械荷载分析

通过施加施工机械设备荷载信息,利用受力分析软件,得到安全可靠的施工方案,施加面荷载的内力与变形分析如图 7 所示。

3.5 内支撑结构拆除力学分析

在利用有限元软件进行拆除分析时,由于支撑的存在,结构的应力分布会比较均匀。当支撑拆除后,结构的应力会重新分配,导致区域的应力集中,结构的竖向变形和横向变形增加,降低了结构的整体性和安全性。在进行有限元分析时,需要仔细考虑模型的简化程度、材料属性的准确性以及边界条件的合理性,以确保分析结果的可靠性。

分析结果表明,支撑拆除过程中的应力与变形

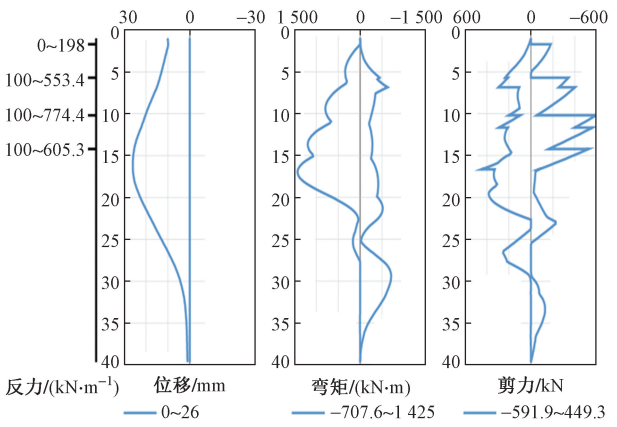


图 7 内力与变形分析

Fig. 7 Analysis of internal force and deformation

均满足要求。拆撑后的结构最大轴力为 6 500kN,均为换撑部位,并向内衰减,而最大弯矩为 950kN·m,位于结构梁端,满足结构使用要求。

4 内支撑拆除监测

4.1 监测周期部署

实时监测支撑施工全过程(见表 1),支撑拆除期间增加基坑监测频率,每 4h 实施 1 次监测,派专人实施 24h 现场巡视,直至所有支撑拆除结束 1 周后才能恢复正常监测频率。在拆除过程中和拆除后,要时刻注意观测基坑位移、沉降情况,发现异常立即上报,及时采取有效应急措施<sup>[7]</sup>。

表 1 基坑内支撑施工阶段监测周期

Table 1 Monitoring period of foundation excavation support construction stage

| 施工阶段  | 管线、土体  | 基坑周边地下水位 | 基坑围护结构 | 内支撑结构位移 |
|-------|--------|----------|--------|---------|
| 内支撑施工 | 1 次/d  | 1 次/d    | 1 次/d  | 1 次/d   |
| 挖土施工  | 1 次/d  | 1 次/d    | 1 次/d  | 1 次/d   |
| 地下施工  | 1 次/2d | 1 次/2d   | 1 次/2d | 1 次/2d  |

4.2 监测数据分析

通过全周期实测实量,所有监测项目的变化量均在设计值允许范围内,单日变化量较大的项目为土体深层水平位移和桩体深层水平位移,日变化量最大的时间点出现在本层内支撑施工期间和拆除期间,最大日变化量达到 2.55mm/d;累计变化量中控制难度最大的项目同样为土体深层水平位移和桩体深层水平位移,因其数值与施工速度成正相关,施工周期长短会对其产生决定性影响,累计变形最大的部位出现在-12~-16m,整体表现为地下连续墙上口和基础下方区段变形较小,地下室区域的中下部区域变形较大,呈现出“鼓肚形”变形曲线。基坑监测数据对比如表 2 所示。

表 2 基坑监测数据对比

| Table 2 Comparison of foundation excavation monitoring data |                             |             |              |             |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 项目                                                          | 单日变化量/(mm·d <sup>-1</sup> ) |             | 累积变化量/mm     |             |
|                                                             | 实测值<br>(max)                | 设计值<br>(报警) | 实测值<br>(max) | 设计值<br>(报警) |
| 周边地面竖向位移                                                    | -0.31                       | ±3          | -22.14       | ±30         |
| 周边建筑竖向位移                                                    | -0.23                       | ±3          | -13.11       | ±25         |
| 立柱竖向位移                                                      | 0.19                        | ±3          | -14.56       | ±25         |
| 地下连续墙顶竖向位移                                                  | -0.20                       | ±3          | -12.45       | ±25         |
| 地下连续墙顶水平位移                                                  | 0.80                        | ±3          | 19.90        | ±25         |
| 供电管线竖向位移                                                    | -0.24                       | ±3          | -23.69       | ±25         |
| 雨水管线竖向位移                                                    | -0.36                       | ±3          | -20.95       | ±25         |
| 污水管线竖向位移                                                    | -0.35                       | ±3          | -24.35       | ±25         |
| 给水管线竖向位移                                                    | -0.32                       | ±3          | -26.42       | ±25         |
| 路灯管线竖向位移                                                    | -0.22                       | ±3          | -14.72       | ±25         |
| 土体深层水平位移                                                    | 2.55                        | ±3          | ±58.00       | ±60         |
| 桩体深层水平位移                                                    | 1.88                        | ±3          | ±46.00       | ±60         |
| 天然气管线竖向位移                                                   | -0.17                       | ±2          | -15.18       | ±16         |

5 结语

内支撑拆除应遵循严格的步骤和安全规范<sup>[8]</sup>,分区域逐步拆除,并实时监测基坑变形和土体压力变化,确保拆除过程的安全可控。监测系统应全方位、多层次、实时监测,涵盖基坑变形、土体压力、地下水位等关键指标,并采用先进的监测技术和设备实时监测,及时发现潜在风险,并采取有效措施。

参考文献:

[ 1 ] 张志强. 黄土地区桩锚支护深基坑受力分析与变形控制[J]. 施工技术(中英文),2025,54(4):88-94.  
ZHANG Z Q. Stress analysis and deformation control of pile-anchored support in deep foundation excavations in loess area [J]. Construction technology,2025,54(4):88-94.

[ 2 ] 王鹏,徐银鹏,何均,等. 紧邻地铁预设地下连续墙组合补强加固技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(13):131-134,139.  
WANG P, XU Y P, HE J, et al. Research on composite reinforcement technology of preset underground continuous wall adjacent to subway[J]. Construction technology,2025,54(13):131-134,139.

[ 3 ] 王凌军,杨宏伟,黄军福,等. 深基坑工程内支撑支护体系全过程技术要点研究[J]. 江西建材,2024(5):187-189.  
WANG L J, YANG H W, HUANG J F, et al. Research on the technical key points of the whole process of inside supporting structures in deep excavation engineering[J]. Jiangxi building materials,2024(5):187-189.

[ 4 ] 肖应辉,刘焕炜. 复合止水帷幕逆作+灌注桩+内支撑支护结构与施工在复杂条件下深基坑工程中的应用[J]. 中外建筑,2010(4):124-125.  
XIAO Y H, LIU H W. Design and construction of composite sealing curtain reverse + pile + inner-supporting structure applied to deep excavation under complicated conditions[J]. Chinese and overseas architecture,2010(4):124-125.

[ 5 ] 陈志远,蔡东平,袁继雄,等. 建筑基坑内支撑结构拆除过程的动态监测及分析[J]. 工程质量,2014,32(6):35-38,44.  
CHEN Z Y, CAI D P, YUAN J X, et al. Dynamic monitoring and analysis of demolish process of inner support structure in the foundation pit[J]. Construction quality,2014,32(6):35-38,44.

[ 6 ] 赵庆强. 深基坑混凝土内支撑拆除技术在城市复杂地形条件下的应用[J]. 中国建设信息化,2018(7):76-78.  
ZHAO Q Q. Application of concrete internal support removal technology in deep foundation pit in urban complex terrain conditions[J]. Informatization of China construction,2018(7):76-78.

[ 7 ] 贾永安. 基于复杂环境下的深基坑设计与变形监测分析[J]. 广东建材,2024,40(6):107-111.  
JIA Y A. Design and deformation monitoring analysis of deep foundation pit in complex environment[J]. Guangdong building materials,2024,40(6):107-111.

[ 8 ] 胡贺祥,缪应璟,宋志强,等. 超大深基坑七圆环内支撑拆除施工技术实践[J]. 施工技术(中英文),2024,53(4):127-132.  
HU H X, MIAO Y J, SONG Z Q, et al. Construction practice of seven-ring internal support demolition in super-large deep foundation excavation[J]. Construction technology,2024,53(4):127-132.