

# 复杂环境下地下空间结构设计与施工技术研究

文 / 刘 莹 深圳市开普天际设计顾问有限公司

**摘要：**本文以某新区全民健身中心地下空间项目为案例，深入分析了该项目在城市中心复杂环境下的结构设计与施工技术问题。该项目位于地质条件复杂的区域，地下障碍物众多，施工空间狭小且周边建筑物敏感。针对这些挑战，文章探讨了地下空间结构设计、基础设计和钢结构设计的具体方案，并提出了有效的基坑施工技术、桩基施工技术以及深基坑支护与逆作施工技术的应用措施。研究表明，这些技术有效解决了地下空间施工中的核心问题，为其他类似项目提供了技术参考和实践经验。

**关键词：**地下空间；结构设计；施工技术；复杂环境

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.100

## 引言

随着城市化进程的推进，地下空间的开发在现代城市建设中变得愈发重要。城市中心地区地下空间开发的复杂性也在不断增加，常常面临着极为复杂的地质环境、施工空间狭小以及周边建筑物保护要求等多重挑战，使得地下空间项目的设计与施工技术要求较高，传统施工方法已无法满足当下的需求。地下空间项目不仅需要考虑结构的安全与功能性，还要在施工中平衡技术要求与对周边环境的影响。基于这些背景，进行复杂环境下地下空间项目的技术研究，对于推动行业技术进步具有重要意义。

### 一、工程背景与项目概述

某新区全民健身中心项目总建筑面积为 197,135.6 m<sup>2</sup>，其中地下部分约为 30,065 m<sup>2</sup>，设计为地下三层，地上十一层，建筑高度为 64 m，如图 1 所示。该工程采用钢框架结构与大跨度钢桁架结构相结合的设计，技术复杂度较高。项目位于城市核心地带，周围建筑密集，地下障碍物繁多，地质条件复杂，这些因素使得设计与施工面临巨大挑战。地下土层主要由粉土和粉质粘土组成，具有较高的渗透性，施工时还需应对地下水水位高、土方开挖量大的问题。基坑的最大开挖深度达到 20.55 m，地质条件复杂，存在多个软弱破碎层和不规则岩性，给桩基施工带来了极大的困难。在桩基设计中，选用了 700 mm、800 mm 及 900 mm 的钻孔灌注桩，桩尖深入 15-3 层中风化安山岩不小于 1.0 m，但在静载试验中，部分基桩出现下沉，揭示了岩层的异常，进一步增加了施工的复杂性。



图 1 某新区全民健身中心建筑示意图

## 二、复杂环境下地下空间项目结构设计要点

### (一) 地下空间结构设计

作为地下三层的结构，设计不仅要考虑上部建筑的荷载，还要保证地下结构的长期稳定和耐用性。特别是在基坑开挖深度达到 20.55 m 时，地下水位对地下结构的影响尤为显著，因此设计中充分考虑了防水措施，采用了防水混凝土和防水处理技术，有效减少地下水的渗透。地下室的结构体系采用了钢骨混凝土柱与钢梁相结合的方式，既保证了结构的刚性和稳定性，也使得整个建筑体系的抗震能力得到了充分提升<sup>[1]</sup>。特别在抗震设计上，设计团队结合了地震荷载的分析结果，选用了适当的抗震措施，确保地下空间结构能够在地震作用下维持其安全性。

### (二) 基础设计与桩基施工

在全民健身中心项目中，基础设计选用了钻孔灌注桩作为支撑结构。在设计初期，项目团队进行了一系列地质勘查和工程分析，根据勘察数据确定了合适的桩基类型，选择了 700 mm、800 mm 和 900 mm 的钻孔灌注桩，要求桩尖进入 15-3 层的中风化安山岩至少 1.0 m。桩基施工中遇到的主要挑战是地下软弱破碎层的存在，部分桩基在静载试验中出现了异常下沉现象，表明岩层存在不均匀性。为应对这一问题，设计团队进行了额外的补勘，并调整了施工方案。在补勘阶段，使用旋挖机提取基岩样本并进行强度检测，根据勘察结果调整了桩基的设计参数，桩基荷载计算公式如下：

$$H = \frac{F_u \cdot D \cdot \sigma}{A}$$

其中， $H$  为桩基的荷载， $F_u$  为桩基的极限承载力， $D$  为桩的直径， $\sigma$  为桩底的抗压强度， $A$  为桩底的面积。这个公式为桩基荷载计算提供了依据，在遇到复杂岩性时，通过调整桩基参数和加固措施，确保了基础的稳定性。桩基施工还面临着施工顺序的挑战，工程需要在多个阶段进行施工，针对这一问题，制定了详细的桩基施工顺序，分阶段完成了栈桥部位、地下连续墙四周的桩基施工，最大程度上减少了工期内的冲突和资源浪费。

### (三) 钢结构设计与安装

全民健身中心项目的上部结构采用了钢框架和大跨度钢桁架相结合的设计,这种结构体系能够有效分散建筑物的荷载,增强建筑物的稳定性。在钢结构设计中,考虑到项目地处城市中心,周围建筑较为密集,设计团队对钢结构的承载能力进行了严密的计算。钢柱的设计最大承重可达 10.5t,使用高强度钢材,保证了结构的抗震性和稳定性。在钢结构的安装过程中,特别是对于大跨度钢桁架的吊装,项目团队使用了两台 1,100tm 的超大型塔式起重机。吊装过程中,为了避免影响周围环境并保证施工进度,塔式起重机的位置、起重能力、吊装半径等参数都进行了详细地计算,并使用 BIM 技术对吊装路径进行了优化,提高了施工阶段的协调性与安全性<sup>[2]</sup>。

### 三、复杂环境下地下空间项目施工技术研究

#### (一) 复杂基坑施工技术

##### 1. 深基坑开挖与监测技术

为了确保基坑的稳定性和施工安全,项目采用了深基坑开挖和实时监测技术,及时掌握基坑施工中的变化。监测措施覆盖了地表沉降、支撑系统的变形及周围建筑物的位移等关键参数,确保了基坑施工过程中对环境及建筑物的影响最小化<sup>[3]</sup>。为保证基坑围护结构的稳定性,采用了地下连续墙与三道钢筋混凝土内支撑相结合的支护方案,提升了基坑的防护能力。基坑稳定性评估还通过动态分析进行了深入探讨。计算支撑系统的变形与内力分布时,使用以下公式分析基坑支撑的最大变形:

$$\ddot{A}h = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

其中,  $\ddot{A}h$  为基坑支撑的最大变形,  $P$  为作用在支撑上的外力,  $L$  为支撑的跨度,  $E$  为材料的弹性模量,  $I$  为支撑截面的惯性矩。根据实际工程数据,  $P=10\text{kN}$ ,  $L=15\text{m}$ ,  $E=2 \times 10^8 \text{N/m}^2$ ,  $I=5 \times 10^{-5} \text{m}^4$ , 代入公式得出:

$$\ddot{A}h = \frac{10 \cdot 15^3}{3 \cdot 2 \times 10^8 \cdot 5 \times 10^{-5}} = 0.225 \text{m}$$

这一计算结果表明,基坑支撑系统的变形保持在可控范围内,保证了支撑结构在施工过程中的稳定性。

##### 2. 岛盆结合土方开挖技术

在全民健身中心项目的基坑施工中,由于地下水位较高且土方开挖量巨大,采用了岛盆结合土方开挖技术。岛盆结合技术的核心思路是在基坑内部设置多个岛状结构,分阶段进行开挖和土方移除工作,逐步降低开挖难度,避免对邻近建筑物的影响<sup>[4]</sup>。

项目在开挖过程中,通过对土质的分析,采用了不同的开挖方式应对不同的土层。具体而言,土方开挖采用分层进行,先开挖边缘区域,再逐步向中央区域推进。

施工时,使用反压技术和深井降水等措施,有效控制了地下水位,避免了水土流失。表 1 为某新区全民健身中心项目岛盆结合土方开挖过程中的土方开挖量与施工效率数据。

表 1 岛盆结合土方开挖量与施工效率

开挖阶段	开挖深度 (m)	开挖土方量 (m <sup>3</sup> )	施工机械数量	施工时间 (天)
第一阶段 (边缘)	5	15,000	3	10
第二阶段 (中央)	10	20,000	5	12
第三阶段 (底部)	15	25,000	6	15
第四阶段 (深层)	20.55	30,065	8	20

由表 1 所示,第一阶段主要集中在基坑的边缘区域,施工机械较少,施工周期较短;随着开挖逐步深入,施工机械数量逐步增加,开挖土方量和施工时间也随之增加。整个基坑土方开挖量达到 90,065 m<sup>3</sup>,施工周期为 57 天。岛盆结合土方开挖技术显著提高了施工效率,并有效控制了土方开挖对周围环境的影响,保障了工程的顺利进行。

#### (二) 桩基施工技术

##### 1. 多钻头桩基施工技术

在全民健身中心项目的桩基施工中,复杂的地下岩土条件带来了许多技术挑战,项目采用了多钻头桩基施工技术,使用配备多个钻头的机械设备进行并行钻进,从而加快施工进度能够减少单一钻孔作业中的等待时间<sup>[5]</sup>。在项目实施过程中,选择了 700 mm、800 mm、900 mm 三种不同直径的钻孔灌注桩,桩尖需深入至 15-3 层中风化安山岩至少 1.0 m,保证桩基的承载能力。采取多钻头共同施工的方式,显著缩短了施工周期,提高了桩基施工的速度。在设计阶段,充分考虑了多钻头施工技术的高效性,对施工设备的性能进行了严格评估,保证设备能够适应复杂的岩土条件并实现高效钻进。在具体施工操作中,采用了旋挖钻机与冲击钻机的组合使用,在穿越不同层土壤和岩石时才能够顺利推进,保证钻孔精度符合要求,避免常规单钻头作业中可能出现的孔径偏差问题。

##### 2. 软弱破碎层和复杂岩性应对措施

在地质勘查过程中发现,桩基所在区域存在多层软弱破碎层和不规则岩性。为了解决这一问题,工人首先进行了精准的补勘工作,进一步确定了破碎层的分布及其强度特征。桩基设计中对这些复杂地层进行了适当调整,采取加固措施保证桩基能够穿透软弱层并稳固入岩。在具体施工过程中,针对软弱破碎层,采用了合适的钻头,如直筒式钻头和两瓣式嵌岩钻头相结合,在穿越复杂岩性时能够顺利施工并减少钻孔卡钻现象。根据施工情况,

工作人员动态调整每个桩基的设计参数，表2是针对该项目软弱破碎层与复杂岩性应对措施的施工进展与成效数据。

表2 软弱破碎层和复杂岩性应对措施进展表

施工阶段	地层类型	钻头类型	钻孔直径 (mm)	钻进深度 (m)
第一阶段 (初勘)	软土层与碎石层	旋挖钻头	700	10
第二阶段 (加固)	破碎岩层	嵌岩钻头	800	15
第三阶段 (穿透)	中风化安山岩层	两瓣式嵌岩钻头	900	20
第四阶段 (稳定)	强风化安山岩层	高强度旋挖钻头	900	25

表2展示了在软弱破碎层与复杂岩性施工过程中，采取了不同钻头类型和钻孔直径的施工策略。在初期阶段，使用了较小直径的旋挖钻头穿越软土层与碎石层，钻进深度达到10m。随着施工深入，钻头类型逐步升级，采用了适应破碎岩层的嵌岩钻头和两瓣式嵌岩钻头，顺利穿越中风化安山岩与强风化安山岩。

### (三) 深基坑支护与“逆作”施工

#### 1. 两墙合一与地下障碍物处理

在全民健身中心项目的基坑支护施工中，项目位于城市核心区域，地下障碍物密集且地质条件复杂，选择了“两墙合一”技术，结合了地下连续墙和水泥土搅拌墙的优点，能够有效应对复杂的地质环境，提升基坑的稳定性。地下连续墙主要负责围护功能，而水泥土搅拌墙用于加固土体、减少土方位移并防止水土流失。在项目实施中，基坑开挖深度达到20.55m，施工时遇到废弃管道、旧基础等地下障碍物，这些障碍物可能会影响地下墙体的施工质量。在实际施工过程中，采用了先进的技术设备，如成槽机和搅拌钻机，确保“两墙合一”结构施工的精确度。针对不同施工环境，施工团队协调了多种机械设备的配合，保证地下连续墙和水泥土搅拌墙无缝衔接。施工团队还制定了详尽的分段施工计划，及时清理地下障碍物，避免潜在的施工风险影响基坑支护，表3是施工过程中地下障碍物处理的相关数据。

表3 地下障碍物处理情况

障碍物类型	障碍物位置	处理方式	处理深度 (m)	施工进度 (天)
废弃管道	基坑南侧	清理与拆除	4	2
旧基础	基坑东侧	挖除与重建	5	3
地下电缆	基坑西侧	迁移与加固	3	1
水管管道	基坑北侧	移除与替换	2	2
土层软弱破碎层	基坑中央	加固与支撑	6	4

表3列出了基坑施工过程中遇到的主要地下障碍物类型、处理方式和施工进度。数据表显示，废弃管道和地下电缆的处理相对简单，施工进度较快。

#### 2. 应用逆作施工技术

在全民健身中心项目的基坑施工过程中，由于项目周边环境的特殊性以及基坑开挖的深度要求，选用了逆作施工技术，这种施工方法通常用于深基坑开挖，特别适合地下空间建设，可以有效地保障周围建筑物和地下设施的安全。在本项目中，基坑开挖最大深度为20.55m，采用逆作施工方式，即先开挖安置房区域的基础，再逐步推进至全民健身中心区域，这样可避免对已施工部分的破坏，并确保基坑稳定。为了进一步提高施工精度，施工团队还使用了激光测量技术，并配合动态监测系统对基坑的变形、倾斜等情况进行实时监控，不仅提高了施工的精确度，还最大程度地减少了施工对周围环境的影响，提升了施工的效率 and 安全性。

### 结语

深入研究某新区全民健身中心地下空间项目的设计与施工技术，本文阐明了在复杂环境下运用创新设计与施工技术克服基坑开挖、桩基施工以及基坑支护等技术难题的方法。研究表明，采用“两墙合一”技术、逆作施工方法和多钻头桩基施工等措施，能够有效应对复杂地质条件及其对施工进度和安全性的不利影响。尽管如此，项目施工中仍面临一些挑战，尤其是在地下障碍物处理和深基坑动态监测等方面的技术问题，至今仍未完全解决。未来的研究可以进一步聚焦于深基坑施工中的动态监测技术应用研究，探索更加高效的障碍物处理方法，不断提高施工安全性及效率，推动地下空间建设技术的持续发展。

### 参考文献

- [1] 金振, 王超迪. 城市中心复杂环境条件下地下空间结构施工关键技术[J]. 建筑技术, 2024, 55(19): 2308-2311.
  - [2] 陆巍. 既有建筑增设地下空间结构转化桩柱一体施工技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(07): 1035-1038.
  - [3] 代云焜. 探讨大型地下空间项目的结构设计[J]. 低碳世界, 2024, 14(06): 82-84.
  - [4] 俞天波, 杨帆. 地下空间结构大范围拆改加固施工技术[J]. 上海建设科技, 2022, (05): 42-46.
  - [5] 陈涵. 基于地下空间结构的模板施工技术分析[J]. 四川建材, 2021, 47(06): 118-119.
- 作者简介: 刘莹, 1971年7月, 女, 汉, 福建人, 浙江大学建筑学士, 国家一级注册建筑师, 总经理、建筑设计顾问, 研究方向: 建筑设计、建筑工程。