

文章编号: 1007-2993(2026)02-0202-11

# 厦门滨海回填地层大开洞深基坑半逆作法 支护设计与实测研究

沈孟兴

(中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司, 福建厦门 361000)

**【摘要】** 厦门某深基坑工程位于城市中心区, 场地地处临海潮间带回填区, 地质条件复杂, 周边环境保护要求严苛。为实现基坑变形控制与工程经济性协同目标, 提出“两墙合一+大开洞结构楼板”的半逆作法支护体系, 辅以一柱一桩竖向支承系统。采用理论分析、数值模拟、动态设计-信息化施工全流程管控相结合的综合技术方法, 完成基坑设计与施工。监测数据显示围护墙最大深层水平位移仅 34.2 mm, 周边地表沉降普遍小于 20 mm, 保障了周边环境安全。本研究总结了大开洞楼板等效水平刚度取值方法, 提出了复杂地层地下连续墙成槽工艺优化路径, 研发了适用于水平楼板的高效支模技术及梁柱节点构造等措施, 同时针对地连墙墙体缺陷成因提出改进措施。工程实践及研究表明: 滨海回填区深基坑采用大开洞半逆作法支护设计合理可行, 大开洞的楼板水平支撑刚度需根据楼板宽度与厚度综合确定, 建议取值范围为 30 ~ 85 MN/m<sup>2</sup>, 设计中可根据施工需求分区确定各层楼板设计荷载并优化竖向支承体系。研究成果可为临海复杂地质条件下类似深基坑工程提供技术参考。

**【关键词】** 临海深基坑; 半逆作法; 大开洞楼板; 地下连续墙; 实测变形

**【中图分类号】** TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0176

## Design and field measurement study of semi-top-down support method for large-opening deep excavation in reclaimed coastal land, Xiamen

SHEN Mengxing

(China Arms Industry North Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China)

**【Abstract】** A deep foundation pit project in Xiamen, located in the urban center within a complex geological environment of a coastal intertidal zone backfill area, faced challenges of dense surrounding buildings, intersecting utility lines, and stringent environmental protection requirements. To achieve the dual objectives of foundation pit deformation control and project cost-effectiveness, a semi-top-down support system combining dual-wall integration with large-opening structural floor slabs was proposed, supplemented by a vertical support system featuring one column and one pile. A comprehensive technical approach combining theoretical analysis, numerical simulation, and dynamic design-to-construction information management was employed to complete the design and construction process. Monitoring data revealed that the maximum deep-seated horizontal displacement of the retaining wall was only 34.2 mm, with surrounding ground surface settlement generally less than 20 mm, effectively safeguarding the safety of the surrounding environment. This study summarizes methods for determining the equivalent horizontal stiffness of large-opening floor slabs, proposes an optimization pathway for the continuous diaphragm wall trenching process in complex strata, and develops measures such as efficient formwork techniques for horizontal floor slabs and beam-column joint construction. Additionally, it proposes improvement measures addressing the causes of defects in continuous diaphragm wall structures. Results indicate: The semi-top-down method for deep foundation pit support in coastal backfilled areas with large openings is reasonably feasible. The horizontal support stiffness of large-opening floor slabs should be comprehensively determined based on slab width and thickness, with a recommended range of 30 MN/m<sup>2</sup> to 85 MN/m<sup>2</sup>. Furthermore, during design, floor slab design loads can be zoned according to construction requirements, and the vertical support system design can be optimized. This research provides technical guidance for similar deep foundation pit projects in complex coastal geological environments.

**【Key words】** deep foundation pit near the coast; semi-reverse method; large opening floor slab; continuous diaphragm wall; measured deformation

作者简介: 沈孟兴, 男, 1990 生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程设计。E-mail: 824269881@qq.com

## 0 引言

随着我国沿海地区城市化进程的持续推进,城市地下空间开发需求激增,临海基坑工程逐渐向深层化、复杂化发展。临海城市普遍存在复杂地质、动水环境,加之现阶段城市化建设多邻近敏感建(构)筑物,基坑支护面临复杂的水文地质、工程地质及环境条件,支护体系及周边环境的变形控制难度极大,成为地下工程建设中的一大技术难点<sup>[1-4]</sup>。同时,地下大空间要求的大开洞设计又为传统基坑支护设计提出严峻挑战<sup>[5-7]</sup>。半逆作法集合了顺作法(自上而下开挖)与全逆作法(先施工主体结构再开挖)的施工优势,充分发挥分阶段变形控制的时空转换优势,已逐渐成为复杂深基坑工程的重要解决方案<sup>[8]</sup>。

近年来,国内外学者针对深基坑支护技术开展了大量研究。常规地质条件下,顺逆结合工法、预应力支撑体系等已形成较为成熟的设计理论<sup>[9-10]</sup>。王亚辉<sup>[11]</sup>、娄国欣<sup>[12]</sup>对地下车站大开洞结构受力状态进行了分析;黄致兴等<sup>[13]</sup>利用监测数据及其他异常情形对某软土基坑有限元模型进行标定,动态修正支护设计。然而,临海地区特有的水文地质条件,加之楼板大开洞导致的边界条件突变,以及半逆作施工中各工况的力学转变差异,使得临海复杂深基坑建设过程中仍存在诸多亟待解决的关键问题,如支护设计对砂层的适应性、大开洞刚度取值方法、复杂地层动态设计等。复杂环境下临海深基坑大开洞半逆作法支护设计仍未形成系统性的设计方法,亟需结合工程实践系统性验证。

本文以厦门某临海深基坑工程为例,针对滨海潮间带回填区的复杂地质条件,综合考虑工程区工程地质条件与周边环境,开展支护型式比选,提出并实践了“两墙合一+大开洞结构楼板”的半逆作法组合支护体系,构建了理论分析、数值计算与动态设计-信息化施工全流程管控相结合的综合技术方法,总结并量化了大开洞楼板等效水平刚度的取值范围,优化了复杂地层地下连续墙成槽工艺、水平楼板支模技术及节点构造,并提出针对墙体缺陷等特殊工况的动态处置措施,以期为类似复杂环境下的深基坑工程提供参考。

## 1 工程概况及地质条件

### 1.1 基坑概况及周边环境

工程位于厦门市中心城区,基坑竖向投影呈矩形,长 162 m,宽 103 m,基坑大面开挖深度 20.4 m,两主楼电梯井坑中坑深约 4.6 m。

拟建地下室外墙距用地红线仅 4 m。基坑四周

为市政道路,道路距离用地红线约 3.5 ~ 12.0 m 不等。场地原为旧造船厂拆迁地,西南角用地红线距海岸线沿线约 60 m。场地东侧距基坑约 56 m 为住宅区,分布有 2 ~ 4 层砖混结构老旧建筑和高层建筑;南侧市政路中间有高架桥,路南距基坑约 44 m 为某商业中心,设 3 ~ 4 层地下室;西侧距基坑约 24 m 为公交场站;北侧距基坑约 20 m 为寺庙和商业酒店。基坑周边地下管网错综复杂,距离用地红线 1.0 ~ 4.0 m,管网包括雨水、污水,给水、地下电缆、燃气等,埋藏深度 1.0 ~ 4.5 m 不等。基坑场地周边环境如图 1 所示。

### 1.2 工程地质与水文地质条件

场地地处滨海潮间带,于 20 世纪 80 年代回填。地面标高 4.2 ~ 5.4 m,高差 1.2 m。基坑开挖深度影响范围内的地层为杂填土、填石、填砂、淤泥及淤泥质土、粉质黏土、粗砂、残积砂质黏性土及下部花岗岩风化带。其中杂填土主要为黏性土混建筑垃圾、石块,硬杂质块径一般 5 ~ 30 cm,含量约 30% ~ 40%;填石主要为中等—微风化花岗岩块石,块石粒径一般 20 ~ 40 cm,含量约 60% ~ 80%,块石间充填物主要为淤泥、中粗砂。填土大部分为 20 世纪 80 年代回填,最近回填大致发生在 2000 年前后。淤泥或淤泥质土呈流塑—软塑状,在上覆填土荷载的长期作用下,基本完成自重固结。填石+填砂+淤泥的组合厚度普遍约 15 m,部分区域达 18 m。场地典型工程地质剖面图见图 2,主要岩土参数见表 1。

勘察期间的稳定水位埋深为 2.6 ~ 4.0 m,开挖期间揭露主要为孔隙潜水及承压水,其中,孔隙潜水主要赋存于人工填土层中下段,并以填石、填砂为主要含水层,属强透水层,由于距海岸线约 60 m,该层地下水与海水存在一定水力联系;承压水主要赋存于残积土上部的粗砂层和基岩风化带的孔隙—裂隙中,承压水位埋深约 5.0 m,承压水头约 8.5 m。砂层属于强透水层,由于其分布范围及厚度均较小,储水空间有限,富水性较差;而其它属弱透水层,富水性较差。临近场地海域正规半日潮长期的平均潮差约 4 m,且沿海地区多风且风速较大,其中厦门全年平均风速 3.4 m/s,全年大于或等于 8 级大风的天数 22.4 d。厦门沿海地区夏秋两季受台风影响比较明显,1956 年以来在厦门附近 100 km 以内登陆的台风每年平均近 1 个。

### 1.3 临海基坑支护重难点分析

基坑支护的核心在于平衡安全、经济与环保三重目标,在临海复杂环境中,制约基坑安全的因素更

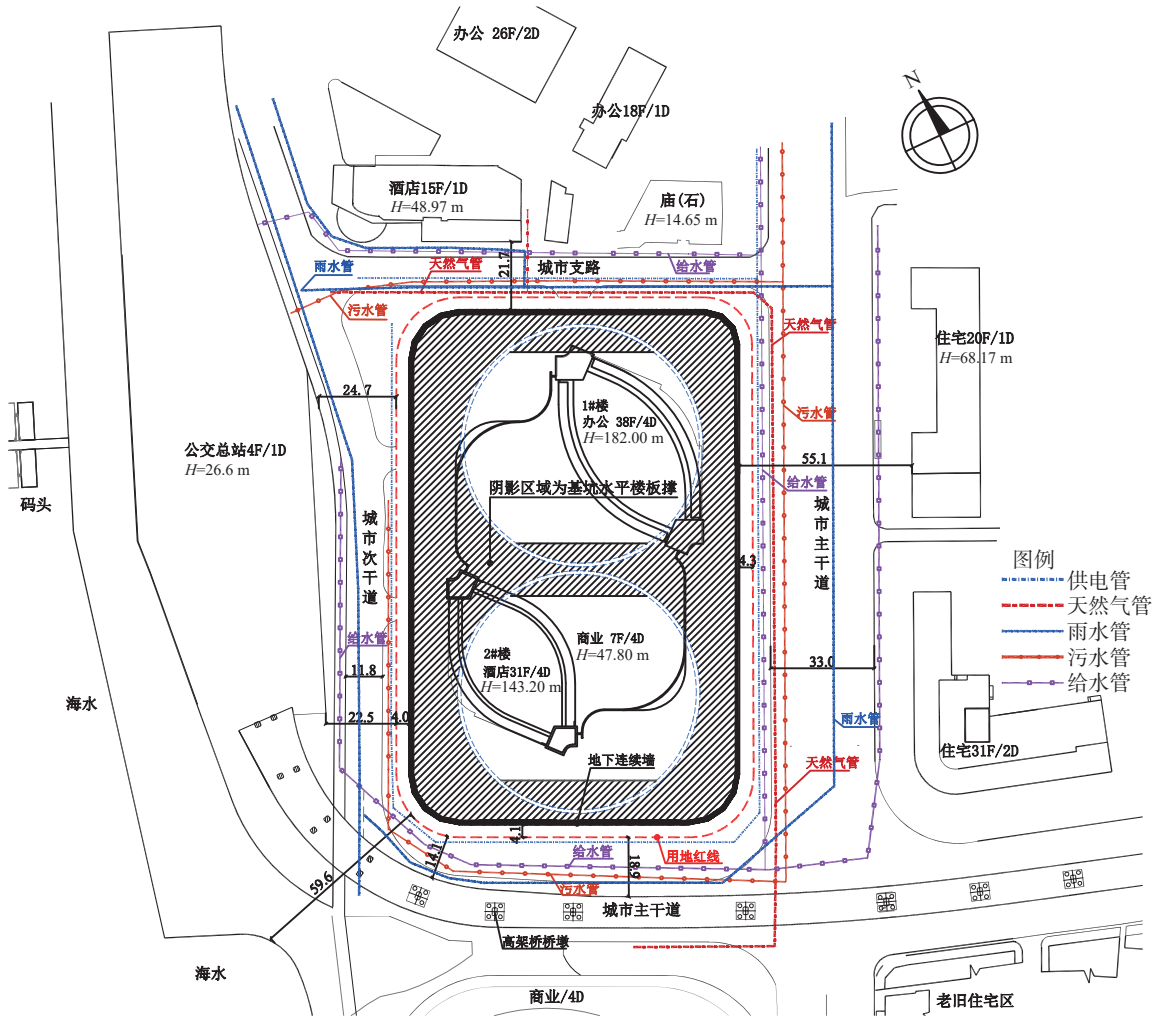


图 1 场地周边环境

Fig. 1 Site perimeter environment

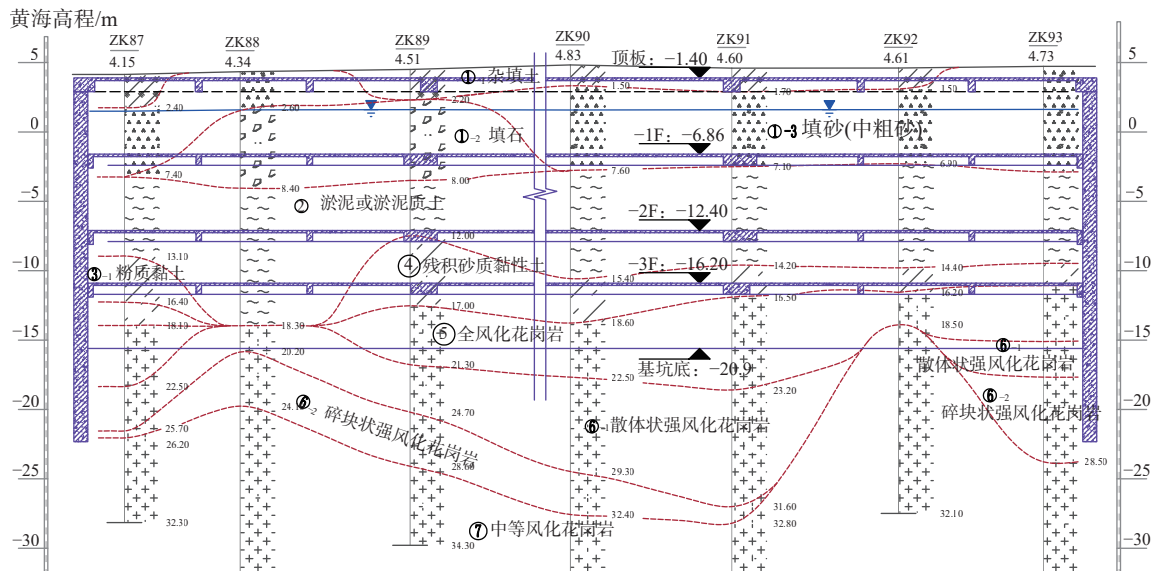


图 2 典型工程地质剖面图

Fig. 2 Typical engineering geological cross-section

加复杂,综合分析基坑支护潜在重难点有以下几个方面:

(1) 基坑规模大, 基坑深度达 20.4 m, 属于深大基坑, 地质条件差, 周边环境复杂, 环境保护要求高。

表 1 主要岩土层物理力学性质指标  
Tab. 1 Key physical and mechanical properties of major geologic layers

层号	岩土名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	土层厚度/m	直剪快剪		渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
				黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
①-1	杂填土	18.2	1.5~6.1	15.0	15.0	$1.0\times 10^{-3}$
①-2	填石	20.5	1.6~12.1	0	30.0	$2.4\times 10^{-2}$
①-3	填砂	18.5	1.7~7.60	0	25.0	$2.2\times 10^{-2}$
②	淤泥及淤泥质土	16.4	0.9~11.0	9.0	5.0	$2.0\times 10^{-6}$
③-1	粉质黏土	19.6	0.8~3.3	22.0	16.0	$5.0\times 10^{-6}$
③-2	粗砂	19.0	1.0~2.3	5.0	23.0	$2.0\times 10^{-2}$
④	残积砂质黏土	18.3	1.5~9.8	18.0	23.0	$1.0\times 10^{-4}$
⑤	全风化花岗岩	19.5	1.1~9.8	25.0	28.0	$1.5\times 10^{-4}$
⑥-1	散体状强风化花岗岩	21.0	0.4~43.8	32.0	30.0	$2.5\times 10^{-4}$
⑥-2	碎块状强风化花岗岩	23.0	0.5~57.2	40.0	35.0	$2.0\times 10^{-3}$
⑦	中等风化花岗岩	25.5	未揭穿	180.0	42.0	$5.0\times 10^{-5}$

(2)施工场地小,施工组织难度大,周边为闹市区,土方外运难。

(3)半逆作法中需严格平衡开挖顺序、支撑施作时机与上部结构施工进度。

(4)基坑距离海岸线仅 60 m,且开挖范围内地下水与海水存在一定水力联系,潮汐的水位波动变化将改变基坑地下水位。同时,工程区范围回填砂层属强透水层,传统降水易导致周边地层沉降或海水倒灌。

(5)临海区夏季台风等强降雨天气随机性大,基坑内集排水措施要求高。

(6)开挖范围软弱地层具有流变性,大开洞区域结构刚度突变以及半逆作法节点受力复杂等。

## 2 基坑支护设计

### 2.1 支护体系选型

综合基坑安全、经济与环保三重目标,并结合基坑工程地质条件与周边环境,以解决支护重难点为导向,比选了“荤素咬合桩+临时钢筋混凝土内支撑”、“地下连续墙+临时钢筋混凝土内支撑”、“地下连续墙+楼板撑”三种技术方案,三种方案均能够实现安全建设目标,对周边环境影响均较小,从建设经济性考虑,“荤素咬合桩+临时钢筋混凝土内支撑”造价最高,“地下连续墙+临时钢筋混凝土内支撑”次之,“地下连续墙+楼板撑”最低,因此选用“地下连续墙+楼板大开洞”的半逆作法施工工艺,具体开挖工况步骤如表 2 所示。

半逆作法支护方案采用地下连续墙做为挡土构件,以大开口的地下结构楼板做为水平支撑形成大开洞环撑体系(见图 3),同时,为满足水平传力要求,地

下室首层下沉广场等局部楼板缺失面积较大处均采用水平楼板封闭,待底板封闭后再向上逐层拆改。竖向支承体系则是充分利用主体结构的“一柱一桩”,遇局部主体柱网间距较大时,增设临时格构柱,采取临时与半永久构件相结合的设计思路,在地下施工阶段采用钢格构柱承受竖向荷载,逆作施工完成后外包混凝土形成劲性混凝土柱。

表 2 基坑开挖工况步骤  
Tab. 2 Steps for excavation conditions

开挖工况	标高/m	支模方式	工况描述
工况一	-4.1	脚手架	从地坪开挖至顶板梁下 1.8 m, 施工顶板
工况二	-9.5	脚手架	开挖至-1F梁下 1.8 m, 施工-1F梁板
工况三	-14.2	矮脚撑	开挖至-2F梁下 1.0 m, 施工-2F梁板
工况四	-18.0	矮脚撑	开挖至-3F梁下 1.0 m, 施工-3F梁板
工况五	-20.9	底板垫层	开挖至底板底, 施工底板

为确保支护结构体系与周边环境安全可控,建立多维度、多参数的监测体系,对连续墙的侧向位移、主筋应力、坑外水位、立柱沉降、道路沉降等进行实时监测。

### 2.2 “两墙合一”地下连续墙设计

本项目采用地下连续墙作为围护结构,通过整合临时围护与永久结构功能实现“两墙合一”。地下连续墙采用平面杆系结构弹性支点法进行分析,基坑开挖阶段墙体侧向土压力采用主动土压力,永久使用阶段墙体侧向土压力则采用静止土压力,并按两个阶段内力进行包络设计。

为平衡工程安全性与经济性,结合周边环境与地

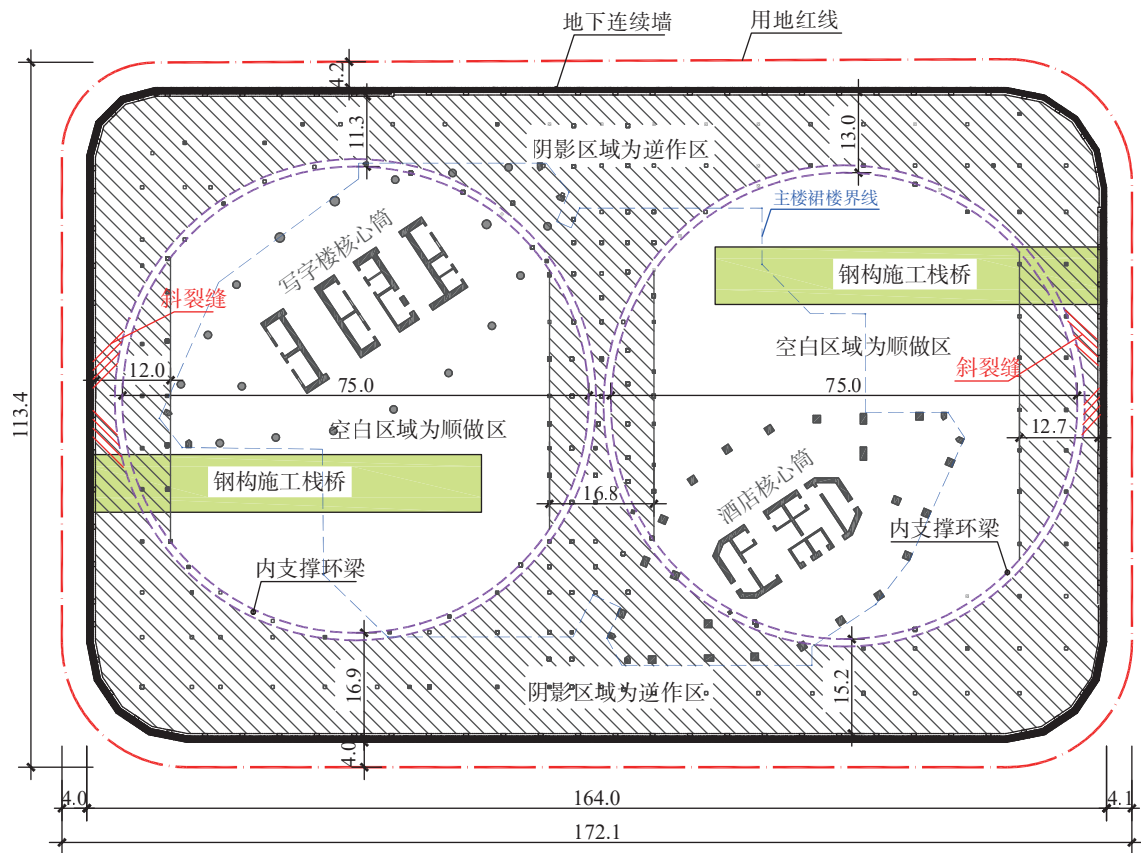


图3 支护结构平面图(单位:m)

Fig. 3 Plan view of support structure (Unit: m)

质条件,地下连续墙设计两种墙体厚度:基坑东侧(地质条件较好且远离海岸)墙厚 0.8 m,其余段墙厚 1.0 m。地下连续墙标准单元槽段长度为 6.0 m,全场区共设置槽段 86 幅;地下连续墙有效长度 24.7 ~ 26.2 m,并以墙底进入全风化花岗岩或散体状强风化花岗岩约 7.0 m 为成槽结束标准,对于部分槽段位置中等风化基岩面高于基坑底情况,则以墙底进入中等风化花岗岩约 3.0 m 作为成槽结束标准。基坑典型支护剖面见图 4。

如图 5 所示,为实现墙体连续传力,各个槽段间采用工字钢接头,同时为改善混凝土绕流问题,采用在工字钢外侧焊接薄铁皮,并在一期槽段超挖空腔区采用砂包回填的处理方式,并在坑内对应槽段接缝处设置扶壁柱,连续墙内预埋插筋和钢筋接驳器与各层楼板、底板连接。此外,在槽段接缝外侧增设高压旋喷桩进行止水防渗(见图 6)。

项目场地位于滨海潮间带回填区,填石与填砂(中粗砂素填土)自稳性差,地下连续墙槽壁易坍塌,为提高槽壁稳定性,对槽壁采取预加固措施,在无块石障碍物区域采用水泥土搅拌桩加固,在填石区则采用高压旋喷桩加固。同时,为控制连续墙沉降,对连

续墙采用了墙底后注浆,注浆压力 2.0 ~ 3.0 MPa。

### 2.3 水平支撑体系设计

本项目采用半逆作法施工,各层地下室结构楼板兼作水平支撑体系,为满足出土需求,在楼板环形区域设置大开孔,并配置圆撑加强(见图 3)。对各层车道出入口及首层下沉广场等区域采用水平楼板封闭,待地下结构整体成型后再进行拆改。地下楼层设计信息见表 3。

大开孔楼板因其跨度大、传力复杂,合理的水平支撑刚度取值成为设计的关键。为此,设计采用同济启明星 BSC 软件进行楼板平面分析,并与连续墙进行整体协同计算。分析表明:基坑南北两侧狭窄区域的楼板水平刚度约为 30.0 MN/m<sup>2</sup>,其余区域为 55.0 ~ 85.0 MN/m<sup>2</sup>,其中中部水平对撑和楼板较宽区域取上限值,均处于合理范围。基于平面分析确定的水平刚度参数,分别进行支护结构单元计算和整体协同分析。通过提取各层楼板标高处最大支反力,采用盈建科软件对结构楼板进行强度校核与配筋计算。需指出的是,本项目楼板两大圆环支撑梁按轴压比 0.5 控制,顶板面仅考虑 3.0 kPa 荷载,其他层板面考虑 1.5 kPa,局部材料堆载区域按需复核设计。开挖

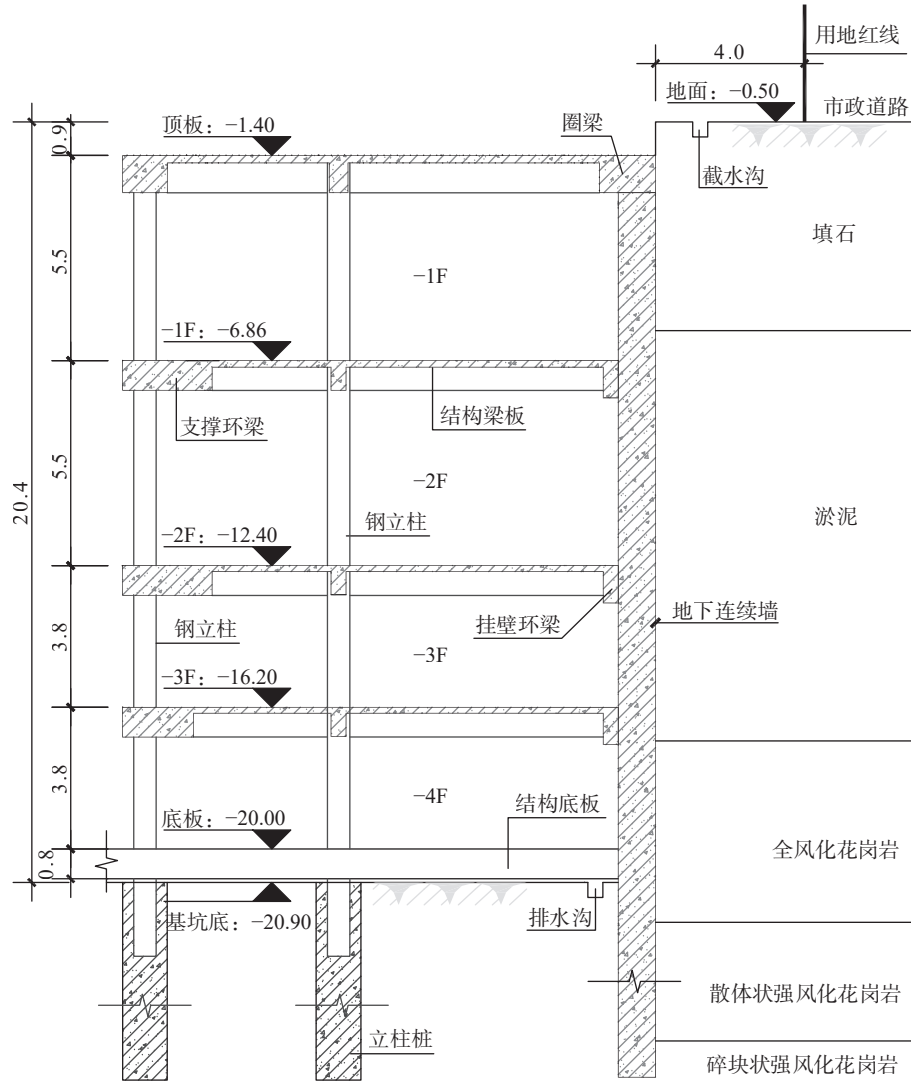


图4 典型支护剖面(单位:m)

Fig. 4 Typical support profile (Unit: m)

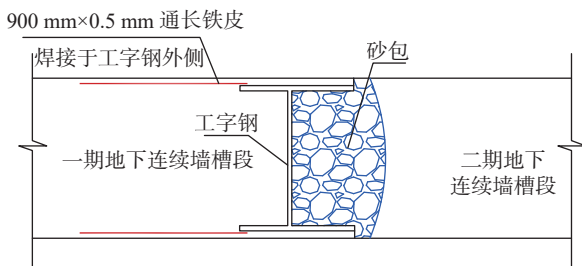


图5 地下连续墙二期槽段成槽接头处理

Fig. 5 Joint treatment for trench segments in phases I and II of the underground continuous wall

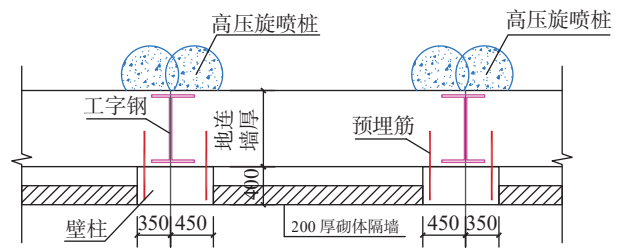


图6 地下连续墙槽段扶壁柱(单位:mm)

Fig. 6 Bracing columns for underground continuous wall trench sections (Unit: mm)

表3 地下楼层设计信息

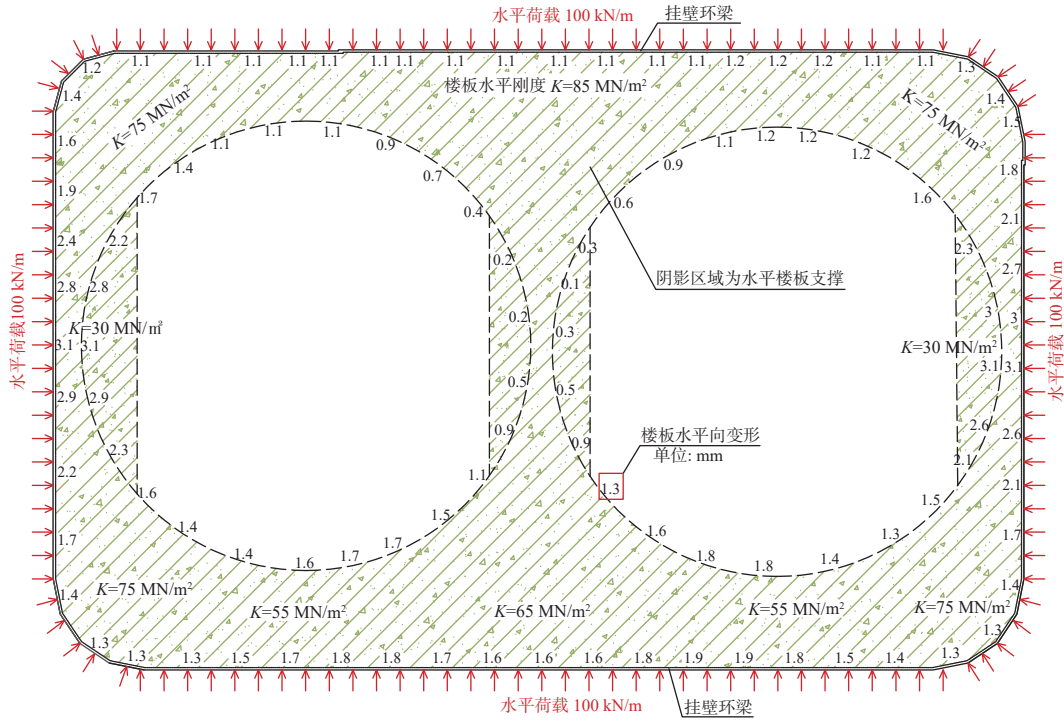
Tab. 3 Basement Floor Design Information

楼层	板厚/mm	梁系布置	内撑环梁截面/mm	(框架梁/次梁截面)/mm	施工荷载/(kN·m <sup>2</sup> )
顶板	200	十字交叉次梁	1200×900	500×900/300×800	3.0/15.0
-1F	180	单向单次梁	2400×900	400×800/300×700	1.5
-2F	150	单向单次梁	2500×800	400×800/300×700	1.5
-3F	150/200	单向单次梁	1900×800	400×800/300×700	1.5

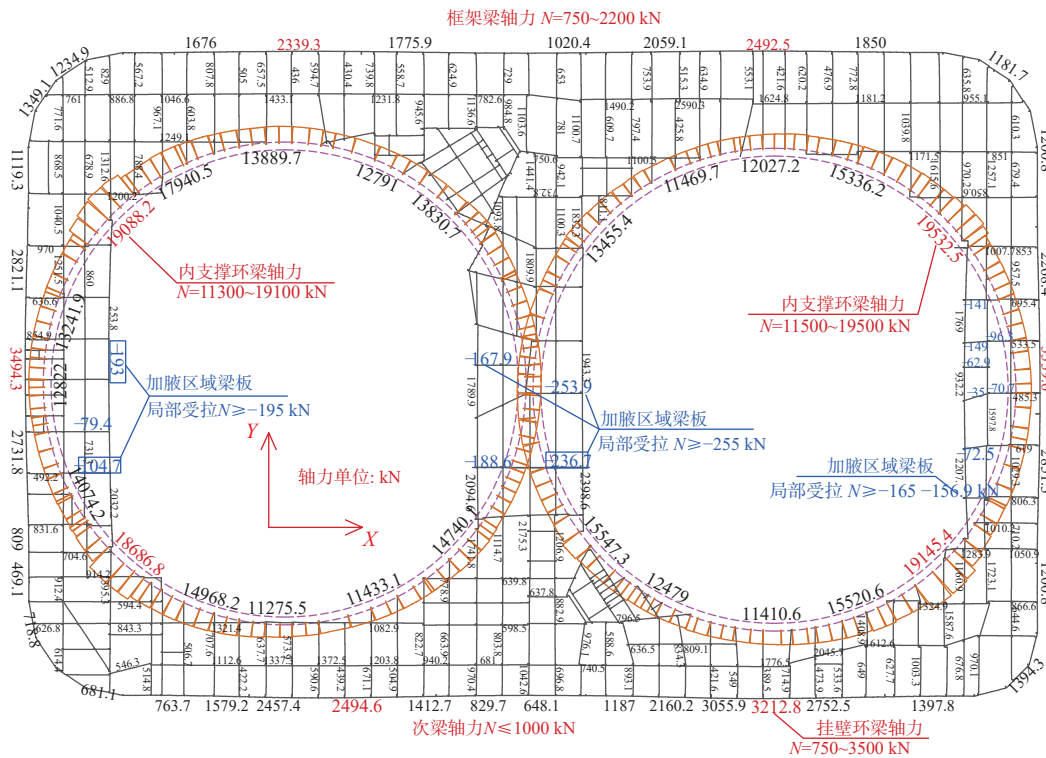
工况下,盈建科软件和同济启明星 BSC 计算出的楼板内力下基本相近,楼板应力基本为压应力,局部小范围受拉,均为合理范围值,具体计算结果见图 7。

此外,为减少水平受力局部应力集中,对顶板楼

板标高存在高差的部位设置有腋角构造。为实现水平、竖向的整体性设计,顶板与地下连续墙压顶梁采用同步浇筑工艺,中间层楼板则通过周边环梁的预埋钢筋与地下连续墙连接,底板则采用预埋钢筋接驳器



(a)水平楼板刚度计算



(b) -2F 楼板梁轴力图 (-2F 水平围压最大)

图 7 水平支护结构计算

Fig. 7 Calculation of horizontal support structure

及直埋钢筋实现与连续墙的可靠连接。

#### 2.4 竖向支承系统设计

如图 8 所示, 施工阶段采用一柱一桩作为竖向支承体系, 立柱采用角钢格构柱, 截面尺寸 500 mm×500 mm, 根据承受的竖向荷载, 选择采用不同型号的等边角钢和缀板焊接而成, 并辅以 1#主楼 3 根钢管混凝土柱及 2#主楼 8 根十字型钢柱共同承载。立柱桩均采用工程桩, 桩端持力层以中等风化花岗岩为主, 并实施桩端后注浆加固。立柱长度系数按两端铰支, 取  $\mu=1.0$ , 计算偏心距取 1/200, 双向偏心; 格构柱应力比按不大于 0.75 作为控制原则, 中间工况取结构

梁中心至基础垫层底标高, 最后工况则以-3F 结构梁中心至立柱桩顶下 5 倍格构柱边长为准。节点连接需满足设计安全的基本要求, 格构柱-楼板梁节点设置抗剪栓钉; 主梁钢筋需穿越格构柱分歧或缀板时采用磁力座钻成孔工艺; 特定节点实施加腋加强处理等, 同时要求钢柱锚固深度 $\geq 3$  m、锚固区缀板外侧焊接 $\phi 25$  横向抗剪钢筋等。立柱垂直度不大于 1/300, 施工过程中采用校正调节架进行控制, 施工过程中钢柱采用后插法植入工程桩, 同时钢柱-桩间隙采用级配砂石回填密实, 进而保障竖向传力路径明确, 确保工程质量和结构安全。

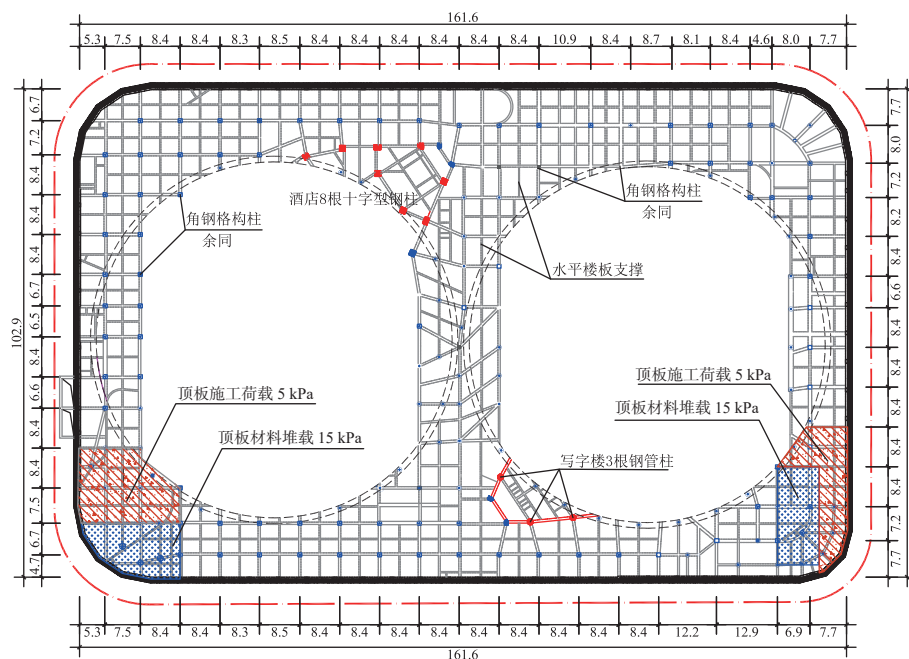


图 8 支护竖向支撑系统平面图(单位:m)

Fig. 8 Plan view of vertical support system (Unit: m)

### 3 支护施工过程优化

基坑工程作为地下空间开发的基础环节, 其施工过程优化调整直接关系到工程安全、成本控制及建设周期。本项目基坑连续墙成槽过程优化主要体现在以下几个方面:

(1) 在填石层中采用冲抓成槽机成槽时, 部分槽壁中的填石以探头石的形式分布, 成槽机下抓受限, 采用超声波侧壁仪准确定位探头石位置后, 旋挖钻机以一定倾斜度凿除。

(2) 部分槽段施工时遇废弃箱涵, 成槽时无法留置护壁泥浆, 在槽段中回填水泥黏土掺和物, 并用冲击钻机夯实以封堵箱涵口。

(3) 场地中等风化基岩面起伏大, 部分区域基坑开挖深度内分布有中等风化花岗岩层, 成槽机遇碎块状—中等风化岩面时改用冲孔钻机, 槽底满铺冲击

后, 再改用方锤修整槽底。

(4) 受场地空间限制, 需在地下室顶板设置材料堆场, 为此在堆场下增设临时格构柱加强, 在地下室顶板留多处小开口作为施工材料下料口。

### 4 基坑工程实施效果与总结

#### 4.1 实施效果

基坑地下连续墙于 2021 年 4 月动工, 2022 年 1 月完成 86 幅地下连续墙施工, 2022 年 3 月进行土方开挖, 2023 年 8 月挖至坑底, 基坑施工效果见图 9, 截至投稿项目主体结构已封顶。

工程进程中, 分别于地下连续墙施工阶段、地下室开挖阶段及主体结构施工至 $\pm 0$  后对基坑周边道路和人行道进行地质雷达探测, 3 次探测结果表明地面下 6 m 深度范围内土体未见异常。

基坑监测数据简况见表 4。基坑监测显示: 地下



图9 基坑开挖完成

Fig. 9 Completion of foundation pit excavation

连续墙深层水平位移值为 13.2 ~ 34.2 mm, 位移方向指向坑内, 墙体最大侧向位移基本位于 15 m 左右深度, 与计算位置基本相符(见图 10); 场地周边道路沉

降监测显示, 土方车外运道路地面沉降 21.2 ~ 42.8 mm, 其余道路沉降均小于 20 mm, 周边道路和人行道未见明显裂缝; 周边地下管网和建筑物未见明显变形。整体支护结构体系与周边环境处于安全状态, 地下室结构的顺利实施, 表明本基坑工程设计合理可靠, 施工阶段的动态设计亦显著提高了施工效率。

受地层条件和施工操作等因素影响, 局部地下连续墙体存在两类缺陷: 一是墙体存在夹泥孔洞, 主要是由于杂填土地层中存在塌孔空腔, 加之混凝土浇筑时导管上拔偏快造成的; 二是墙身钢筋外露, 主要是由于淤泥层中局部单元槽发生缩径(见图 11 下部), 导致墙体保护层不足造成的。

表4 现场监测数据简况

Tab. 4 Summary of field monitoring data

监测项	地连墙水平位移/mm	坑外地表沉降/mm	(周边建筑物沉降/水平位移)/mm	周边管线沉降/mm	坑外水位/m	内撑环梁轴力标准值/kN
监测值	13.2 ~ 34.2	13.6 ~ 42.8	3.7/0.0	18.6	-5.82 ~ 0.46	13833 ~ 16176
预警值	45	40	10	20	-8.0	17190

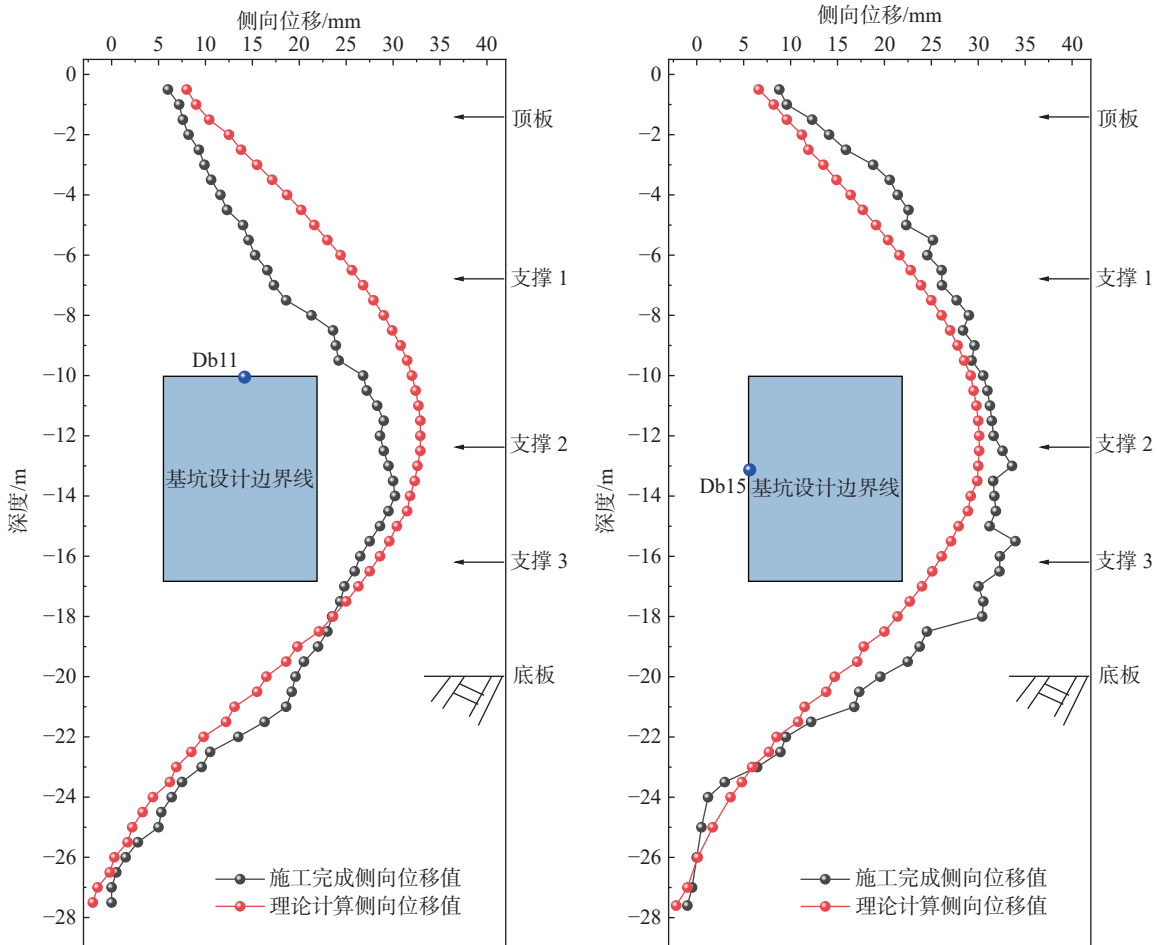


图10 连续墙侧向位移理论与监测对比图

Fig. 10 Comparison of theoretical and monitored lateral displacement of continuous walls

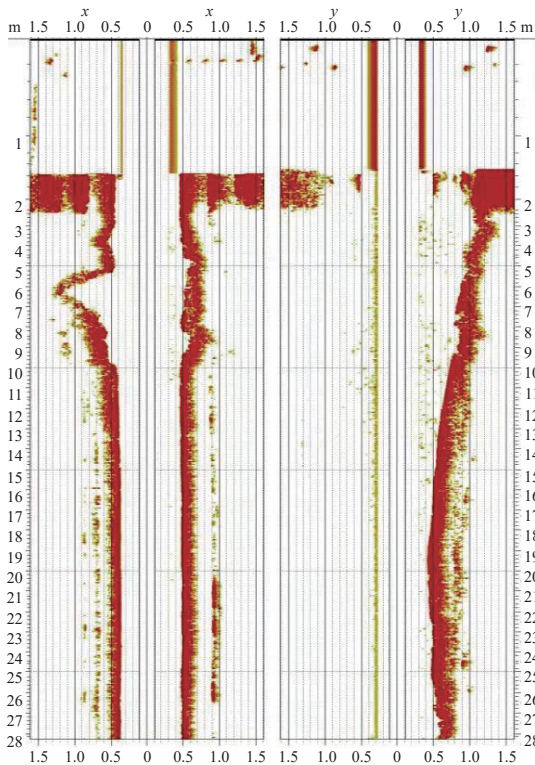


图 11 地下连续墙槽壁超声波检测

Fig. 11 Ultrasonic testing of diaphragm wall trench walls

在各层楼板水平支撑体系中,仅南北短边-1F和-2F 楼板窄处出现剪裂缝(平面位置见图 3 标识),此部位为应力集中和变形较大位置,与计算结果吻合,印证了设计的合理性,其余区域未见明显开裂。

#### 4.2 效果分析与讨论

基坑工程是系统性、动态性极强的工程,需合理统筹设计、施工、监测与管理各环节。项目实施结果表明,支护体系整体安全可控,达到了预期目标。然而,围护墙体缺陷以及水平楼板斜裂缝的出现,揭示了设计中存在的不足,为后续设计优化和施工管理提供了明确方向。

(1)对于填砂、填石与淤泥互层等不良组合地层条件下的地下连续墙设计,需采取针对性优化措施:缩短槽段设计长度以降低成槽风险,适当增加钢筋保护层厚度以提升结构耐久性,并在工字钢接头腹腔内绑扎固定整体泡沫塑料块以提高墙身与接头质量。

(2)地下连续墙混凝土浇筑过程中,应基于槽壁稳定性实时监测数据,动态调整导管提拔速率。

(3)为避免火焰切割开孔对格构柱分肢或缀板造成的热影响区损伤,结构主梁钢筋穿孔宜采用磁力钻钻孔工艺。

(4)当楼板水平向宽度较窄区域因应力集中而出现局部剪切裂缝并伴随显著水平位移时,可采取增大

楼板厚度的措施,以有效提升其平面内刚度及抗剪承载力,从而改善结构性能。

#### 5 结论

(1)“两墙合一”与圆形大开洞水平支撑协同的半逆作法支护体系,集成永久结构与临时支护功能,水平支撑刚度大,支撑内力分布均匀,适用周边环境敏感、施工场地局促且地质条件复杂的深基坑支护。“一柱一桩”竖向支承系统、钢栈桥土方外运通道的设计方式,可有效控制工程成本并提升施工效率。

(2)在逆作法设计分析中,水平支撑体系可采用平面结构模型进行简化分析,大开洞的楼板水平支撑刚度需根据楼板宽度与厚度综合确定,建议取值范围为  $30 \sim 85 \text{ MN/m}^2$ 。应按施工需求分区确定各层楼板设计荷载,进而优化竖向支承体系设计。

(3)逆作法开挖工况设计应统筹协调水平楼板的浇筑方式,并依据揭露土层特性选取适宜的模板支撑体系。当地基土层为软土或松散填土时,推荐采用盘扣式脚手架支撑体系;不同施工阶段的开挖面标高宜控制在梁底标高以下  $1.5 \text{ m}$ 。

(4)通过优化地连墙槽段长度与接头工艺、动态控制混凝土浇筑速度等措施可减少地下连续墙施工缺陷;通过加厚狭窄区域水平支撑楼板厚度提升其抗剪性能,可避免楼板产生裂缝。

#### 参 考 文 献

- [1] 田野,刘宏,张智峰,等. 中国地下空间学术研究发展综述[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(6): 1596-1610. (TIAN Y, LIU H, ZHANG Z F, et al. A summary of the development of underground space academic research in China[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(6): 1596-1610. (in Chinese))
- [2] 冯海涛. 大开洞竖向半逆作法在超大深基坑工程中的应用[J]. *矿产勘查*, 2024, 15(10): 1929-1936. (FENG H T. Application of the large-scale caving vertical semi-inverse method in super large and deep foundation pit project[J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(10): 1929-1936. (in Chinese))
- [3] 朱宗明,冯瀚文. 复杂地质与动水环境的临海深基坑支护设计与监测分析[J]. *广东土木与建筑*, 2024, 31(9): 30-33,37. (ZHU Z M, FENG H W. Design and monitoring analysis of deep foundation pit support in complex geological and hydrodynamic environments near the sea[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2024, 31(9): 30-33,37. (in Chinese))
- [4] 邓壹萍. 软土深基坑支护工程设计分析[J]. *工程技术*

- 研究, 2024, 9(20): 196-198. (DENG Y P. Analysis on the design of soft soil deep foundation pit support engineering[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(20): 196-198. (in Chinese))
- [ 5 ] 孙 威. 滨海地区深基坑性状的试验及理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (SUN W. Experimental and theoretical study on behaviour of deep excavations in coastal areas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [ 6 ] 张 旭, 王杰杰. 深基坑施工对邻近既有地铁车站附属的影响分析 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(4): 492-498. (ZHANG X, WANG J J. Impact analysis of foundation pit excavation near the existing metro station auxiliary structure[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(4): 492-498. (in Chinese))
- [ 7 ] 彭 顶, 王锐松, 倪芑芑. 滨海地区明挖隧道深基坑实测数据与开挖优化研究 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(8): 13-18. (PENG D, WANG R S, NI P P. Study on field measurement and optimization of excavation scheme for a deep foundation pit of open cut tunnel in coastal area[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(8): 13-18. (in Chinese))
- [ 8 ] 董月英, 魏建华, 李象范. “半逆作法”施工的深基坑工程的设计应用探讨 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 229-233. (DONG Y Y, WEI J H, LI X F. Design and application of deep foundation pits by use of semi-reverse construction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 229-233. (in Chinese))
- [ 9 ] 董 诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3793-3796,3802. (DONG C, ZHENG Y R, CHEN X Y, et al. Research on composite support pattern of soil nails and prestressed anchors in deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3793-3796,3802. (in Chinese))
- [10] 应宏伟, 王奎华, 谢康和, 等. 杭州解百商业城半逆作法深基坑支护设计与监测 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 79-83. (YING H W, WANG K H, XIE K H, et al. Design and monitoring of deep excavation with semi-top-down method in Hangzhou Jiebai commercial building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 79-83. (in Chinese))
- [11] 王亚辉. 地铁地下车站厚板大开洞结构受力性能分析与优化设计 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017. (WANG Y H. The force analysis and optimum design of large open-hole structure of subway station[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese))
- [12] 娄国欣. 地铁地下车站厚板大开洞结构受力性能研究与影响因素分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018. (LOU G X. The mechanical performance study and influence factors analysis of large open-hole structure of subway station[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (in Chinese))
- [13] 黄致兴, 谭 路, 谌 越, 等. 某软土深基坑动态设计方法探讨及变形控制技术研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(9): 25-29. (HUANG Z X, TAN L, CHEN Y, et al. A study on dynamic design method and deformation control technology for deep excavation in soft soil[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2024, 31(9): 25-29. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-16