

软土地层中狭长型深基坑施工技术研究

廖 钧

上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

软土地层中的狭长型深基坑工程因其地质条件复杂、变形控制严格及环境敏感性强, 成为土木工程领域的难点。本文选取上海世博地道与海口文明东越江通道两大典型工程, 从工程概况、地下水控制、施工组织三个角度进行系统性对比分析。两个项目均位于软土地层, 且基坑都是临江而建, 地下水丰富。但通过对基坑降水和基坑开挖的精心策划, 成功应对承压水风险, 并实现了长距离基坑的高效施工。本文结合两地实践经验, 分析总结软土地层中狭长型深基坑的核心技术要点, 并总结凝练优化建议, 为类似工程提供技术参考与优化思路。

关键词

软土地层, 狭长, 深基坑, 降水, 开挖

Research on Construction Technology of Long and Narrow Deep Foundation Pits in Soft Soil Strata

Jun Liao

Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Long and narrow deep foundation pit projects in soft soil strata are challenging in civil engineering due to their complex geological conditions, strict deformation control requirements and strong environmental sensitivity. This paper selects two typical projects, namely the Shanghai World Expo Tunnel and the Haikou Wenmingdong River Crossing Tunnel, for a systematic comparative analysis from the perspectives of project overview, groundwater control and construction organization. Both projects are located in soft soil strata and their foundation pits are built along rivers with

abundant groundwater. However, through meticulous planning of foundation pit dewatering and excavation, the risk of confined water was successfully managed and efficient construction of long foundation pits was achieved. Based on practical experiences from both locations, this paper analyzes and summarizes the key technical points of long and narrow deep foundation pits in soft soil strata, and distills optimization suggestions to provide technical references and optimization ideas for similar projects.

Keywords

Soft Soil Strata, Long and Narrow, Deep Foundation Pit, Precipitation, Digging

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软土地层具有高含水量、低抗剪强度及显著流变特性,易引发基坑变形、管涌等风险[1]。狭长型深基坑(长宽比 >5)因空间受限、施工周期长,更需综合考虑支护体系合理性及周边环境影响的可控性。上海世博地道(1350 m)与海口文明东越江通道(4380 m)均位于软土地层,且面临复杂水文地质条件与复杂周边环境。本文通过对比两个工程的实践差异,总结软土地层中狭长型深基坑降水与开挖的共性规律,以为类似工程提供理论指导。

2. 工程概况

2.1. 上海世博地道工程

工程位于上海市浦东新区,地道工程沿既有世博大道,下穿国展路、经七路后,在现状打浦路隧道复线以南约 150 m 处接地,北靠黄浦江。地道全长 1350 m,基坑宽度 25.2~49.7 m,最大开挖深度 11.9 m,采用明挖法施工,暗埋段占比 76%(1035 m)。基坑支护体系按开挖深度不同分别采用 $\phi 850$ 三轴水泥土搅拌桩重力坝及 $\phi 850$ 三轴 SMW 工法桩配合首道砼支撑及多道钢支撑,并对相邻 $\phi 2400$ 污水管采用 MJS 工法(全方位高压喷射工法)作为止水帷幕及加固保护。

工程地质表层为杂填土(厚度 1~10.7 m),下部以素填土和灰色淤泥质粉质黏土为主(渗透系数 $8E-06$)。承压水层(位于④粉性土)埋深 16~20 m,稳定水位标高 1.60~1.67 m,突涌风险显著。

2.2. 海口文明东越江通道工程

工程位于海南海口市,项目西起文明东路白龙路交叉口,沿文明东路往东走行,在美苑路以西约 300 m 及以东约 350 m 处设置敞开段,然后下穿滨江西路、南渡江至江东新区东横二路,终点位于东横二路琼山大道交叉口。项目全长 4380 m,其中隧道段全长 2720 m,接线道路全长 1660 m。基坑宽度 10.1 m~49.5 m,包含江中段(最大开挖深度 23.275 m)与陆域段。陆域段基坑支护体系按开挖深度不同采用地下连续墙、SMW 工法桩、钻孔灌注桩、三轴搅拌桩止水帷幕配合首道砼支撑及多道钢支撑组成。江中段采用膜袋混凝土结合钢板桩的方法施工组合围堰,利用膜袋不透水的性能,在膜袋内吹砂充泥后形成堰体挡水带。

工程地质表层为松散杂填土(厚度 1~4 m),下部为砂性土和淤泥质土(渗透系数 K_{v10-7} cm/s 为 0.76)。承压水层(位于②~④层的砂性土层),埋深 3~12 m,水位年变幅 1~2 m,与南渡江江水存在水力联系。

3. 基坑施工技术分析

3.1. 基坑施工分区

按照深基坑施工规程，为确保安全，除严格遵循“先撑后挖、及时封底”的基本原则外，还严格遵循“时空效应”的理论，按照“分段、分层、对称、平衡、限时”的原则进行开挖。

上海项目整体将基坑划分为 I~IV 区，因各施工分区间设置多道围护封堵墙，故结合不同工况采用“跳仓法”进行开挖作业，由 I~IV 的顺序分四个阶段进行施工。

海口项目根据主线与匝道进行分区，共计 A、B、C、D 四条匝道和主线一~八工区，共计十二个工区，其中主线六区与主线七区为江中段，总体按“陆域段→江中段”的顺序进行流水跳仓施工。其平面分区详见图 1。

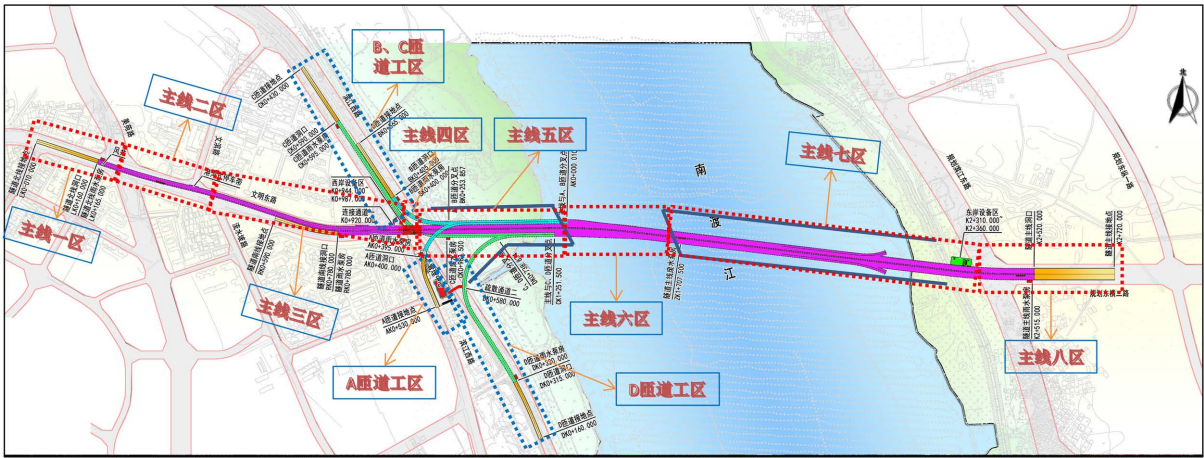


Figure 1. Zoning plan of foundation pit for Haikou Wenmingdong River-crossing passage
图 1. 海口文明东越江通道基坑分区平面图

3.2. 地下水控制

3.2.1. 上海世博地道

根据工程地勘报告，场地内第④2 层粉性土(含亚层)属微承压含水层。根据上海地区区域水文地质资料，微承压含水层水位年呈周期性变化，承压水水头埋深一般在 3~11 m。依据现有勘察资料，第④2 层粉性土层顶界面埋深在 16.0~20.00 m 之间，局部地段④2 层微承压含水层和①3 层潜水含水层相连通。地质剖面详见图 2。

本工程 I-1 区、I-2 区、I-3 区、II-1 区、II-2 区、II-3 区局部深坑开挖深度约 12 m，对其进行底板稳定性验算。地面标高按 4.20 m 计算；坑底第④2 层层微承压水水位埋深在 3.0~12.0 m 之间，按最不利 3.0 m 计算；并按④2 层层顶按最不利埋深 16.0 m 计算；在基坑开挖深度 12.0 m 时进行验算。

1) 根据上海市《基坑工程设计规程》(DG/J 08-61-2018) [2]，基坑底板的稳定条件为基坑底板至承压含水层顶板间的土压力应大于承压水的顶托力，即公式：

$$\sum \gamma_{si} * h \geq \gamma_w * H * F_s$$

式中：h——坑底以下隔水层的覆土厚度(m)；

γ_{si} ——基坑底至承压含水层顶板间的各层土的重度(取 18 kN/m³)；

H——承压水头高度至承压含水层顶板的距离(m)；

γ_w ——水的重度(取 10 kN/m^3);
 F_s ——抗承压水头稳定性安全系数, 取 1.05。

2) 验算第④2 层微承压含水层的稳定性:

即
$$(16-12) * 18 \geq (16-3) * 10 * 1.05$$

计算结果:
$$72 < 136.5$$

根据计算结果, 基坑底板至④2 层微承压含水层顶板间的土压力 72 KN 小于承压水的顶托力 136.5 KN, 基坑开挖有隆起及突涌等安全风险, 基坑开挖时需降低承压水。

3) 进行安全水头验算

根据公式进行安全水头验算如下:

$$(16-12) * 18 \geq (16-X) * 10 * 1.05$$
$$X = 6.1$$

即基坑开挖至坑底时, ④2 层微承压含水层水头至少需降至-4.9 m (绝对标高)以下。故需降低水头 6.1 m。

IV 区、III 区、II-4 区最大开挖深度约 6 m, 基坑开挖无需考虑微承压水突涌风险, 故只布置疏干井。

疏干井(213 口), 按 $200 \text{ m}^2/\text{口}$ 布设; 备用减压井兼观测井(20 口), 按 $2000 \text{ m}^2/\text{口}$ 布设; 真空管井疏干潜水, 减压井控制承压水位。

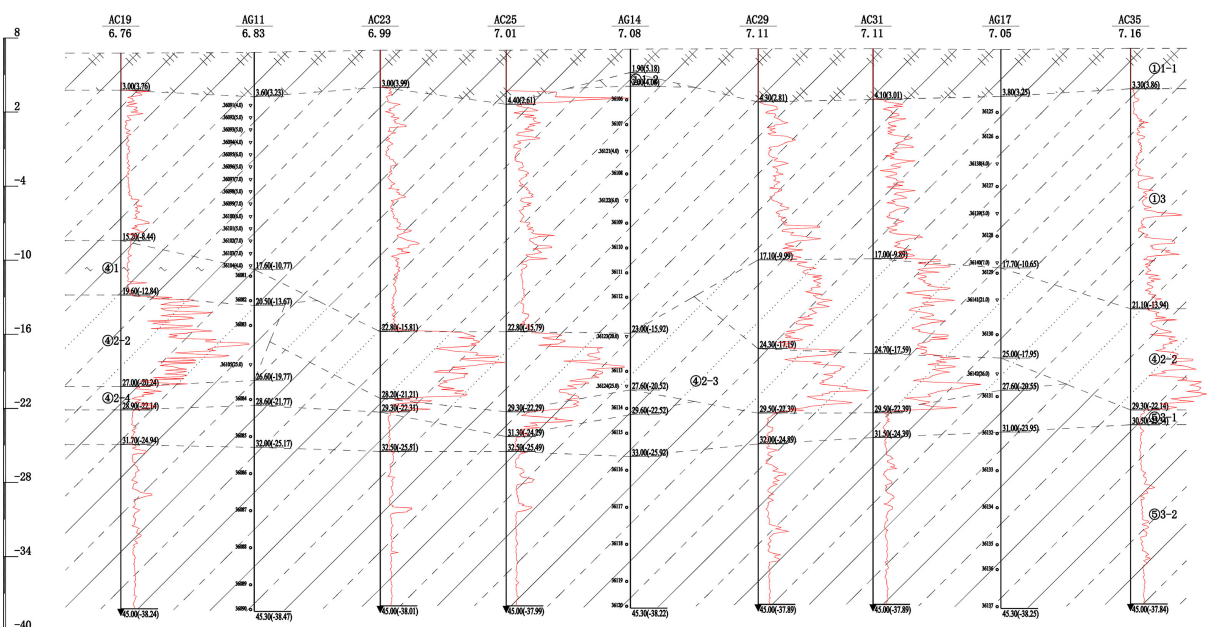


Figure 2. Geological profile of Shanghai expo tunnel
图 2. 上海世博地道地质剖面图

3.2.2. 海口文明东越江通道

根据工程勘察报告, 场区中的砂层, 包含②4 粉细砂, ②5 中砂、粗砂、砾砂、③1 中砂、粗砂、砾砂、③2 粉细砂、③4 碎石、④4 粉细砂及④5 中砂、粗砂、砾砂。因场区上部连续分布厚度大的淤泥层, 中下部连续分布粘性土层, 这些地层为相对隔水层, 所以赋存于上述砂土层中的地下水属弱承压孔隙水。地质剖面详见图 3。

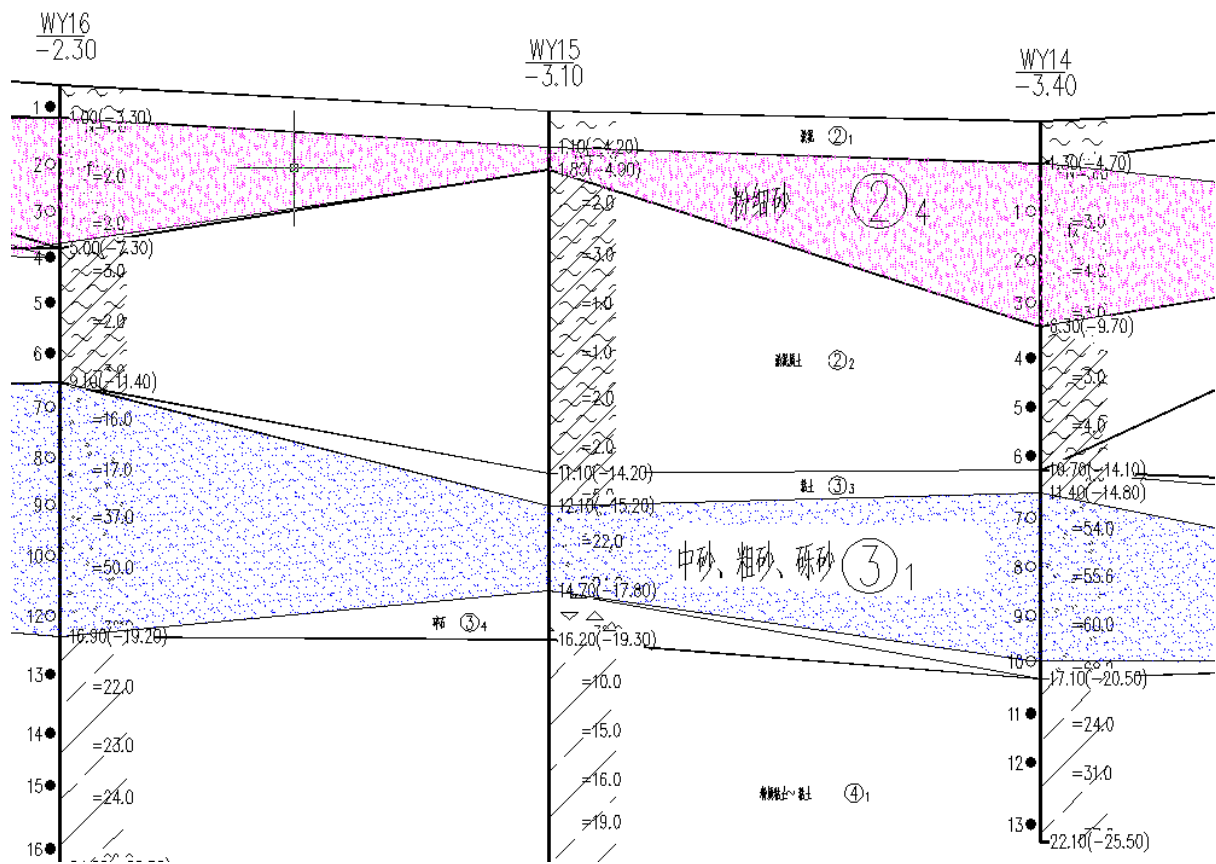


Figure 3. Geological profile of Haikou Wenmingdong River-crossing passage
图 3. 海口文明东越江通道地质剖面图

文明东越江通道项目坑底主要位于③1 中砂、粗砂、砾砂层和②2 淤泥质土层。砂性土层重力释水量较大，若不采取措施降低土层含水量，将造成开挖面积渗水，滑坡，流砂、震荡液化等等不良现象，影响开挖面上的施工，较大的含水量也使得土体自立性差，影响开挖安全。在设计上采取了加深围护结构的措施，完全隔断上部潜水，在起到加固坑壁的同时，也延长了地下水的渗流路径，同时在施工时采取降低地下水位的措施，使水位降至可能产生流土(砂)的土层以下，减小基坑施工的风险。

根据基坑开挖深度及水头高度对安全水位进行计算，因基坑深度过深，且考虑承压孔隙水与南渡江具备一定水力联系，Fs 按 1.10 进行考虑，计算结果如下表 1:

Table 1. Safety water level elevation calculation sheet for foundation pit
表 1. 基坑安全水位标高计算表

工程部位		基坑底标高(m)	土压力(kPa)	降深(m)	安全水位标高(m)
主线	ZK1 + 005.000	-12.5	已揭穿或距离承压层顶较近	13.5	-13.5
	~ZK2 + 520.000	-15.1		16.1	-16.1
南北线	LK0 + 1000.000	-20.0	已揭穿或距离承压层顶较近	—	—
	LK0 + 942.000	-12.0		13.0	-13.0
	LK0 + 644.000	-7.5	117.0	3.4	-3.4
	LK0 + 160.00	-5.12	159.8	0	0

续表

D 匝道	DK0 + 732.000	-15.7	已揭穿或距离承压层顶较近	16.7	-16.7
	DK0 + 590.000	-11.0		12.0	-12.0
	DK0 + 434.000	-6.0		144.0	0.9
C 匝道	CK0 + 880.149	-18.0	已揭穿或距离承压层顶较近	——	——
	CK0 + 735.000	-12.0		13.0	-13.0
	CK0 + 590.000	-5.5		0	0
A 匝道	AK0 + 390.000	-7.0	126.0	2.5	-2.5
B 匝道	BK0 + 395.000	-7.0	126.0	2.5	-2.5

承压水含水层主要存在于③1 中砂、粗砂、砾砂、③2 粉细砂、③4 碎石、④4 粉细砂及④5 中砂、粗砂、砾砂层中，鉴于部分基坑围护结构已经完全隔断上部潜水，结合基坑开挖及承压层层顶深度，施工过程中结合采用了加深疏干井至承压含水层中与潜水一同处理和疏干及降压独立布置的两种处理方式。其中针对承压含水层顶距离基坑底较远(大于 5 m 左右)，且不满足抗浮需求的区域单独布设减压降水井进行减压降水；对于无围护、放坡开挖段以及开挖小于 5 m 的区域采用轻型井点进行辅助降水。

降水过程中在基坑外布置水位观测井兼备用井，用以检验止水帷幕的隔水性及对周边环境的影响。同时对围护无法将围护无法把③1 层隔断的区域，基坑内布置降压观测井，按需进行降水。

3.3. 基坑开挖施工

3.3.1. 上海世博地道

上海世博地道基坑工程施工分 I、II、III、IV 四阶段进行，过程中利用已完成段作为材料堆场，减少垂直与水平运输之间的干扰。在近地铁段，细化分区分块，减小单次卸载量对地铁隧道的影响。

基坑开挖均采用明挖顺作法施工。根据土方开挖要求，横向先挖中间土体，后开挖两侧土体；纵向按分区开挖，每段基坑的开挖长度与分区相对应。竖向：基坑从上至下分层开挖。

开挖顺序：第一层土方开挖→施工第一道围檩、支撑(养护强度达到设计强度)→第二层土方开挖→施工第二道围檩、支撑(养护达到设计强度)→挖第三层土方→施工第三道支撑(养护强度达到设计强度)→开挖第四层土方→施工垫层和底板结构。

1) 第一层土方开挖：为施工圈梁及第一道砼支撑，需先进行头层土方的开挖，开挖深度 1.5 m，配备 2 台 1 m³ 标准挖掘机，挖土至第一道砼支撑下，利用挖掘机直接装车，然后施作冠梁及第一道支撑。

2) 第二层土方开挖：开挖深度约 3.9 m，首先用基坑两侧的长臂挖机挖出坑内小挖机的工作平台，然后将小挖掘机吊入基坑内的工作平台上，再用小挖机分层挖土至第二道支撑下，并由小挖机将土方挖至取土点，由基坑两侧长臂挖机装车，然后施作第二道钢支撑。

3) 第三层土方开挖：开挖深度约 3.4 m，由 12 m 长臂挖机开挖第三道支撑以下的土体，直接挖土装车，由吊车将 1 台小挖机吊放至基坑下配合长臂挖机开挖至第三道支撑下，施作第三道钢支撑。

4) 底层土方开挖：开挖深度约 2.7 m，由坑底小挖机及基坑两侧长臂挖机开挖 2.4 m，然后人工配合小挖机开挖剩余的 30 cm 土体到基底标高，严格控制基底标高，最终完成基坑土方开挖。

5) 边角土方、人工清底土方开挖及出土方法

土方开挖采用人工配合机械实施，基坑内配备 2~3 台 0.4 m³ 小型挖掘机清土、转运，基坑底土方由小挖机归拢至抓斗作业范围，由抓斗挖土装车，最后边角土方施工机械无法作业的，采用人工按要求将其归拢，小挖机转运至汽车吊能够作业的地方，用汽车吊提升至地面。人工归拢的土方由汽车吊下吊斗，人工装土、吊走。基坑开挖剖面示意图 4。

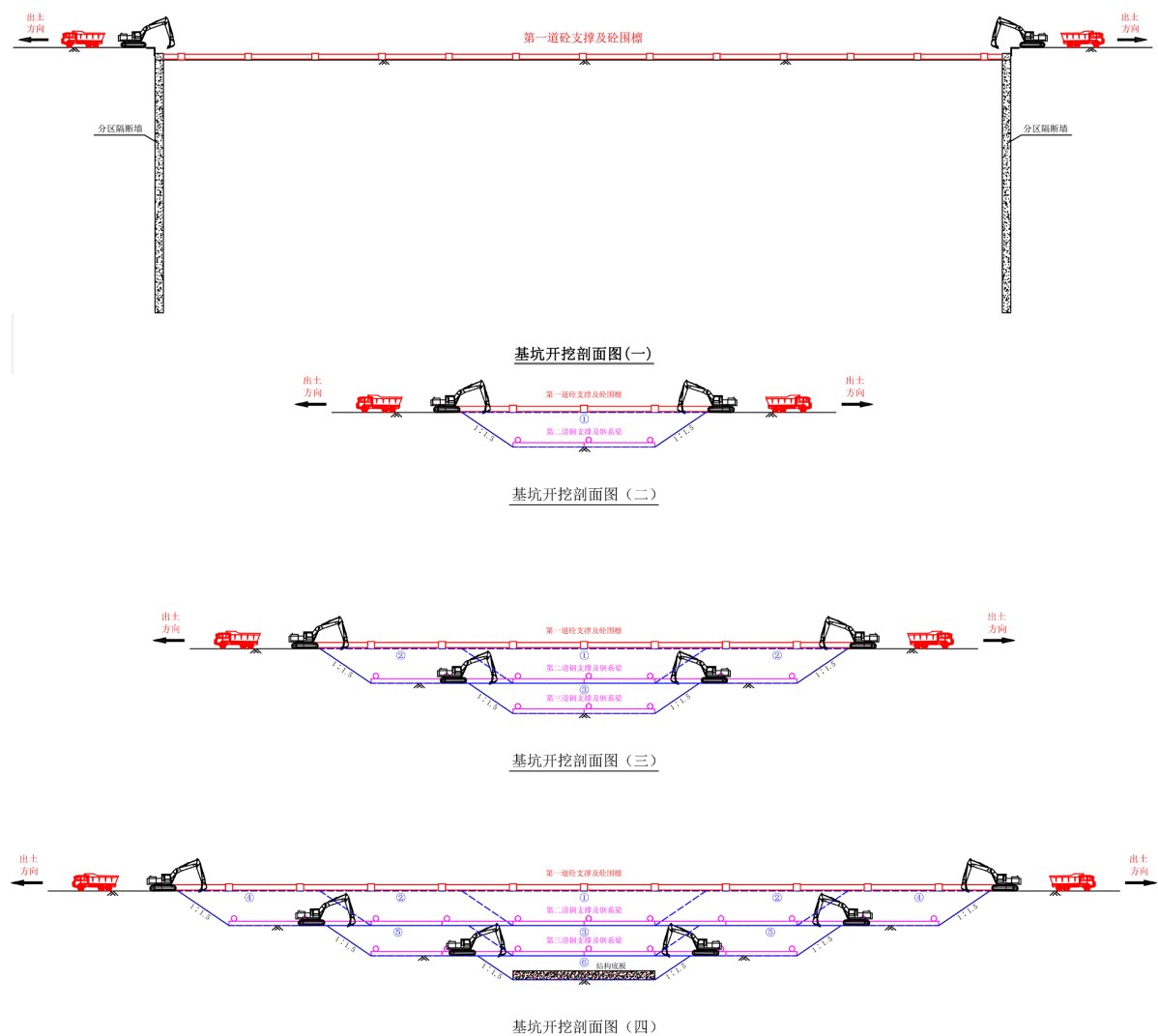


Figure 4. Cross-section of foundation pit excavation
图 4. 基坑开挖剖面图

3.3.2. 海口文明东越江通道

本工程基坑深度 $\leq 3\text{m}$ 的部分，基坑采用放坡开挖形式，放坡比例 1:1.5。在放坡开挖前先对顶部 0.5 m 进行卸载，并维持开挖的沟槽内无水直到施工完成。

根据陆域段土方开挖要求，横向先挖中间土体，后开挖两侧土体；纵向按分区开挖，每段基坑的开挖长度与分区相对应。竖向：基坑从上至下分层开挖。基坑开挖以机械挖土为主，人工修挖为辅，在接近坑底 30 cm 时用人工挖土修整坑底。

- 1) 表层土方采用液压挖掘机挖土，直接装车外运。
- 2) 第 2 层以下土方(第一道钢支撑以下土方，约现场 5 m 以下)采用液压挖掘机(0.2 m^3)挖土，并将土方喂给布置在坑外施工道路上携带 1.0 m^3 蚌式抓斗的 50 t 履带吊机或直臂液压挖掘机，由履带吊机或直臂挖掘机将土方垂直运出坑外装车外弃。
- 3) 机械挖不到的死角采用人工翻挖，喂给液压挖掘机。

图5是基坑开挖方法示意图(以地下连续墙围护处为例，钻孔桩、SMW 工法桩围护处基坑开挖方式类同)。

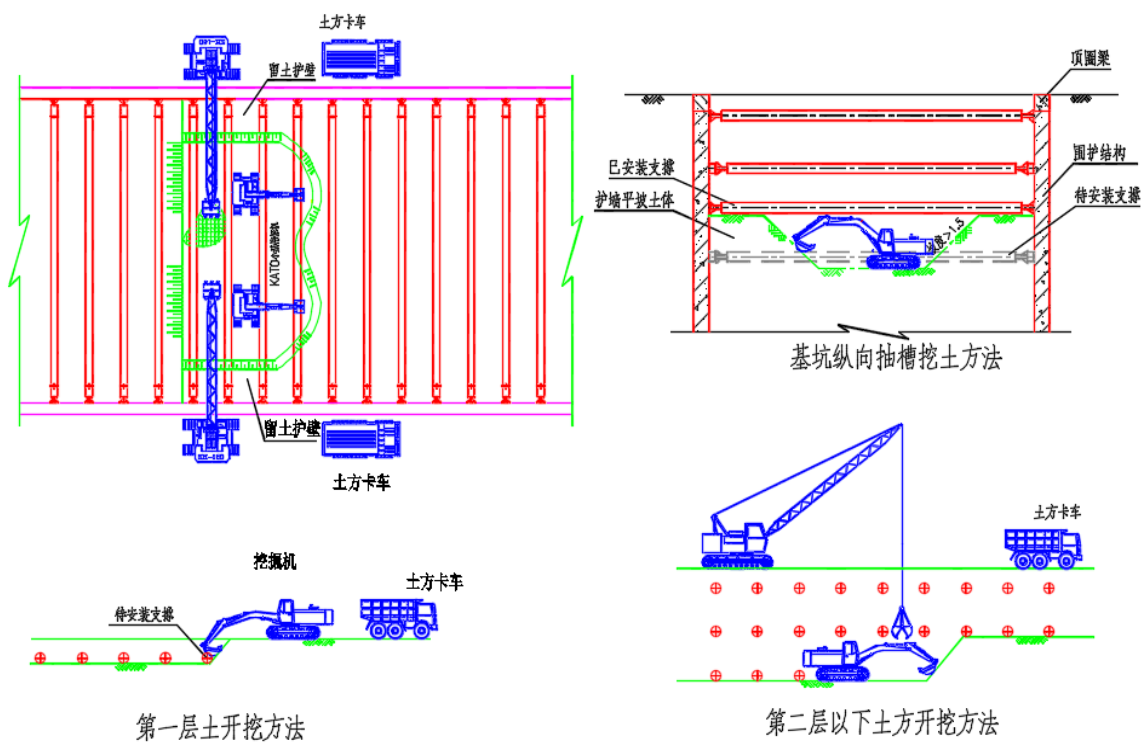


Figure 5. Schematic diagram of foundation pit excavation
图 5. 基坑开挖示意图

为了充分发挥时空效应，基坑开挖须采取合理的开挖步骤，明确基坑土方开挖时每间隔开挖作业单元的空间尺寸、开挖量、支撑时限，使各工况下的基坑变形处于可控状态。海口文明东通道严格按下表 2 所列的施工参数进行基坑开挖作业。

Table 2. Excavation and support construction parameter sheet for foundation pit
表 2. 基坑开挖与支撑施工参数表

每一个开挖单元的空间尺寸				时间限止		适用范围
分段长度(m)	分层厚度(m)	小段宽度(m)	安装钢支撑数量(根)	小段开挖时限(h)	小段支撑时限(h)	设置对撑的条形深基坑
20~25	1.5	12	4	16	8	基坑第 1 层土体
20~25	3~4	6	2	10	6	第 2 层及以下各层土体
20~25	3~4	3	1	5	3	当小段宽度 6 m、安装 2 根钢支撑的施工参数难以控制基坑变形速率时
20~25	2~3	6	含素砼垫层	16		基坑最底层土体

4. 对比与优化

4.1. 支护体系适配性

文中所述的两个项目均临江而建，基坑处于软土深厚区域，不约而同地选择了围护结构加混凝土 + 钢支撑的支护体系。海口项目在 $H > 15\text{ m}$ 时优先选用了地下连续墙，上海项目在城市密集区域且基坑深度较浅时采用 SMW 工法桩 + 局部加固的复合型支护体系，均有效地起到了支撑土体和隔断承压水的作用。

4.2. 地下水控制

两个项目的地下水都和江水具备一定的水力联系,针对承压水地层都采用了“分层降水 + 围护隔水”的措施进行联合控制。上海项目因挖深比海口项目较浅,以“井点疏干 + 止水封堵”为核心,海口项目则通过“深井降水 + 刚性止水”的组合,同时考虑江水与承压水的交互影响,在抗突涌验算中考虑一定的安全冗余,并在施工过程中精细化控制按需降水,降低水位的同时兼顾基坑安全与周边沉降。如海口文明东越江通道风险最大的江中段,其围堰水平变形量及沉降量均在安全范围内[3]。

4.3. 狭长基坑施工

在基坑分区施工时,两个项目皆选择跳仓进行分段作业,如上海世博地道将每一段的开挖至结构封顶时间均控制在 4 个月内,降低基坑变形的同时[4],大大提高了现场的施工效率,在受疫情影响的情况下,有效地保障了生产进度。施工周期及位移曲线见图 6 示例。

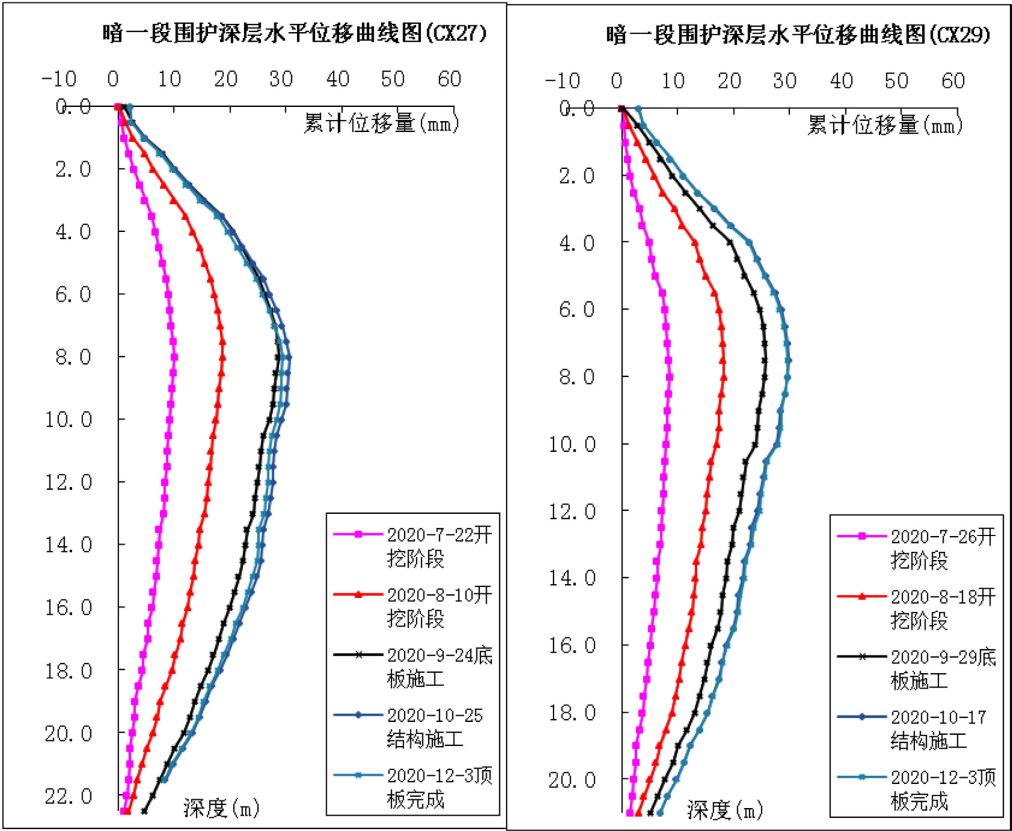


Figure 6. Deep horizontal displacement curve of retaining structure in buried section, Shanghai expo tunnel
图 6. 上海世博地道暗埋段围护深层水平位移曲线图

在基坑开挖时,结合“时空效应”理论优化施工参数及部署,对现场的开挖深度、支撑时间严格进行控制,通过实时信息化监测与工艺优化实现风险可控。

4.4. 优化思路

1) 智能化升级

根据现有技术,可提高信息化、智能化的推广。如物联网(IoT)传感器结合 AI 算法,实现变形预测与

风险快速决策；建立 BIM + GIS 数字孪生平台，模拟不同工况下的基坑响应。

如上海世博地道对深基坑开挖过程的智能支撑体系进行了研究与探索，基于软土地层基坑工程扰动位移特点，研究建立了以位移控制为核心、位移与支撑力综合优化的液压伺服智能控制方法，并经足尺模型试验和工程应用验证其适用性和可靠性[5]。

2) 绿色施工技术

推广 MJS、TRD 等低扰动工艺，减少施工对环境的扰动，以及降低泥浆排放与噪声污染。

采用可回收支护材料或新型建筑材料(如 UHPC 超高性能混凝土)，降低工程碳排放。

如上海某科学装置项目 5 号井基坑最大深度达 45.45 m，为确保基坑和环境安全、风险可控，对基底附近渗漏威胁最大的承压含水层采用了 69 m 深 TRD + 地下连续墙双帷幕的设计思路，将⑦₂层及以上含水层予以隔断，既保证了基坑实施阶段的抗承压水突涌稳定性安全，又有效控制了抽降承压水对磁悬浮基础及线路的影响[6]。

5. 结论

上海世博地道与海口文明东越江通道的实践表明，软土地层中狭长型深基坑的成功实施依赖于地质精准研判、支护体系科学设计、地下水精细化控制及施工组织精细有序。两地工程在支护体系、降水设计、基坑施工方面的经验，可为类似项目提供重要借鉴。在未来可进一步融合智能化技术与绿色施工理念，采用如数字化微扰动搅拌桩加固、混凝土支撑主动变形控制、承压水控制超深隔渗帷幕等绿色、低碳、环境低影响的基坑变形控制新技术，推动深基坑工程向高效、安全、可持续方向发展[7]。

参考文献

- [1] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [2] 海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ 08-61-2018. 上海市《基坑工程技术规范》[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [3] 张轶, 杨光辉, 钟铎炜, 等. 海口文明东越江通道施工及变形实测分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(15): 125-131.
- [4] 王建华. 软土地层深基坑变形控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 1-6.
- [5] 卫俊杰, 王颖轶, 荣建, 等. 基于位移与轴力的软土深基坑开挖扰动控制[J]. 城市道桥与防洪, 2024(1): 214-220.
- [6] 王卫东, 翁其平, 孙建军, 等. 软土地层 45 m 超深基坑工程设计与实践[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 1968-1979.
- [7] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 1-25.