

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.01.006

【第十二届全国基坑工程研讨会暨第四届全国可回收锚杆技术研讨会 论文精选】

# 软土超深基坑工程关键技术问题研究

翁其平<sup>1,2</sup>, 王卫东<sup>2,3</sup>

(1. 华东建筑设计研究院有限公司 上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200011;  
2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200011; 3. 华东建筑集团股份有限公司, 上海 200011)

**摘要:** 高地下水位软土地区地下空间开发利用呈现越来越深的趋势, 随之涌现越来越多的超深基坑工程。基坑开挖深度越深, 将面临更加复杂、更具挑战的一系列技术问题, 基坑与环境的安全风险也随之成倍增长。本文重点介绍软土地区开挖深度 40 m 级以上超深基坑设计与实施的关键技术, 涵盖总体选型、超深地下连续墙、双帷幕体系、内支撑体系、超深止水帷幕及地基加固、深层承压水控制等方面内容, 同时对影响超深基坑变形的工程桩空孔回填及基坑降水等特殊技术问题做了分析与说明。本文所介绍的各项关键技术软土地区多项超深基坑工程中已得到成功应用, 保障了超深基坑与周边环境的安全, 并取得良好的技术、经济和社会效益, 可为软土地区类似超深基坑工程的设计与实施提供借鉴。

**关键词:** 软土; 超深基坑; 双帷幕体系; 超深止水帷幕; 深层承压水控制; 基坑变形控制

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)01-0038-09

## Key technical problems of super-deep foundation pit engineering in soft soils

WENG Qi-ping<sup>1,2</sup>, WANG Wei-dong<sup>2,3</sup>

(1. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China;  
2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200011, China;  
3. Arcplus Group PLC, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** With the development and application of deep underground space in soft soil areas with high groundwater level, many super-deep excavation projects have emerged. The deeper depth of the excavation project, the more complex and more challenging technical problems will be encountered. The safety risks of foundation pits and the environment have also increased exponentially. This paper focuses on the key technologies for the design and implementation of super-deep excavation project with excavation depths above 40 m in soft soil areas, including the overall design scheme, super-deep underground diaphragm walls, double water-resisting curtain systems, horizontal brace systems, super-deep water-resisting curtain and foundation reinforcement, deep confined water control, etc. At the same time, the special technical problems such as pile hole backfilling and excavation dewatering that affect the deformation of super-deep foundation excavation are analyzed and explained. These key technologies have been successfully applied in many super-deep excavation projects which ensures the safety of the excavation and the surrounding environment, and achieved excellent technical, economic and social benefits. These technologies and experiences can provide reference for the design and construction of similar super-deep foundation pit projects in soft soil areas.

**Key words:** soft soils; super-deep excavation; double water-resisting curtain system; super-deep water-resisting curtain; deep confined water control; deformation control

## 0 引言

我国城市基础建设已进入全新纵向立体化开

发与利用阶段, 大规模城市地下工程, 如高层建筑地下室、地下商场、地下停车场、地下变电站、地下轨道交通、大型污水及污水处理系统等得到快速

收稿日期: 2022-08-30

作者简介: 翁其平 (1981—), 男, 海南东方人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事基坑工程、地下工程等方面的设计和研究工作。E-mail: qiping\_weng@arcplus.com.cn。

<https://www.academax.com/doi/10.3785/j.issn.2096-7195.2024.01.006>

发展,与此同时,一些特大城市(如上海等)浅层地下空间开发利用已逐步趋于饱和,正向更深层地下空间方向发展<sup>[1]</sup>。如 20 世纪 90 年代建成的上海人民广场 220 kV 地下变电站工程<sup>[2]</sup>深达 23.2 m; 2010 年建成运营的上海世博 500 kV 地下变电站<sup>[3]</sup>深度达 34 m;上海某重大科学装置五号工作井深度达到 45.45 m;上海苏州河深隧工程试验段圆形工作井<sup>[4]</sup>深度更是接近 60 m。

通常开挖深度超过 30 m 的基坑可称为超深基坑,超深基坑尤其是软土地区 40 m 级以上的超深基坑工程,将面临更大的侧向水土压力、更复杂的工程与水文地质条件、更广范围的环境保护要求,相对应对基坑工程的设计与实施提出了更高的挑战。高地下水位软土地区 40 m 级以上超深基坑面临的主要问题有:(1)深基坑围护结构的防渗漏对策及风险控制问题,40 m 级深度基坑开挖至基底时,坑内外水土侧压力差已达 0.5 MPa 以上,接近甚至超过常规水泥土系隔水帷幕的桩身强度,开挖阶段在巨大压力差作用下,围护结构如发生渗漏易引发严重的涌水涌沙,对基坑和环境安全造成极大危害,需采取针对性技术对策;(2)超深基坑侧向水土压力大幅增长带来的基坑支护结构承载力和变形控制问题;(3)超深基坑将触及无经验可循的更深层承压水处理与环境影响控制的问题;(4)开发及推广适应超深基坑需求的超深围护体、止水帷幕及地基加固等围护新技术新工艺。

本文结合多个超深基坑工程的设计与实践,对 40 m 级以上超深基坑工程所面临的关键技术问题进行研究探讨,供软土地区类似超深基坑工程参考借鉴。

## 1 总体选型

软土地区超深基坑具有投资大、工期长、风险高的特点,其服务的主体工程通常为具有重要社会影响的重大工程。重大工程前期研究阶段在项目选址和结构选型时应统筹考虑超深基坑技术、经济和风险等因素,将有助于降低超深基坑的造价和风险。条件允许时,软土地区超深埋深项目选址应尽量避免紧邻保护要求高的重要建(构)筑物,并应避免将基地设置于复杂工程与水文地质的场地中;结构选型方面,在确保实现建筑功能前提下,条件合适时优先考虑采用受力合理、基坑变形小、防渗性高、工期快且造价低的圆筒形结构<sup>[5]</sup>。

软土地区超深基坑工程总体实施方案根据基

坑规模、环境条件及技术、经济和工期等具体因素,有顺作法、逆作法及顺逆结合三类实施方案可选择。三类实施方案在软土地区超深基坑中均已有成功应用,如上海某重大科学装置五号工作井(方形基坑面积 4 535 m<sup>2</sup>,挖深 45.45 m),以及上海苏州河深隧工程苗圃工作井(圆筒直径 30 m,挖深 56.3 m)和云岭西工作井<sup>[6]</sup>(圆筒直径 34 m,挖深 57.8 m),3 个超深基坑均采用顺作法实施方案;上海世博 500 kV 地下变电站<sup>[3]</sup>直径 130 m、挖深 34 m 的圆形基坑,采用逆作法实施方案;上海中心<sup>[7]</sup>基坑面积 34 960 m<sup>2</sup>,裙楼区挖深 26.7 m,塔楼区 31.2~33.2 m,采用塔楼区先顺作、裙楼区后逆作总体实施方案,以上所提的软土地区超深基坑工程均采用超深地下连续墙作为围护体。

## 2 超深地下连续墙

软土地区超深基坑对基坑围护体的承载力、抗弯刚度、整体性以及抗渗性能都提出了极高的要求。软土地区 40 m 级以上超深基坑基本上都采用超深“两墙合一”地下连续墙作为围护体。超深地下连续墙应结合其挖深、地质及环境等条件进行设计<sup>[8]</sup>,尤其重点应在防止开挖阶段渗漏上采取针对性技术对策,具体有如下 3 个方面:

### 2.1 槽段接头

地下连续墙槽段接头型式直接决定墙身防渗可靠性。传统的地下连续墙有圆形锁扣管、工字钢及十字钢板等成熟的接头型式,但这类接头型式有其适用深度,如圆形锁扣管一般适用于入土深度 40 m 内的地下连续墙,而工字钢和十字钢板等接头则适用于入土深度在 60~70 m 之内的地下连续墙。当地下连续墙入土深度超过 70 m 时,传统的槽段接头夹泥夹砂易引起渗漏和接头箱顶拔困难等问题,而套铣接头可以较好规避这些问题。

套铣接头地下连续墙是用双轮铣槽机将两侧先施工的一期槽段混凝土接缝部分的泥沙及搭接部分混凝土直接削除,同时将接缝面铣削成锯齿状的新鲜混凝土接触面,其后浇筑当中二期槽段的混凝土,与两侧一期槽段形成整体性强、防渗性好的连接<sup>[9]</sup>。套铣接头具有免设置用钢量大的刚性接头、免接头箱、无预挖区及无绕流问题等优点,近年来在超深基坑工程中得到较广泛的应用,如上海某重大科学装置的 1~5 号工作井和上海苏州河深隧工程试验井等超深基坑地下连续墙工程。

## 2.2 墙身预埋件

“两墙合一”地下连续墙一般通过预埋插筋和接驳器与主体结构基础底板、中楼板及内衬墙或壁柱等进行连接。已有工程实践表明,当地下连续墙内预埋较密的插筋和接驳器等预埋件时,插筋接驳器位置在混凝土水下浇筑时易被泥浆中泥沙包裹,混凝土石子也易卡滞于该位置,导致该位置墙身混凝土易发生质量缺陷,严重时成为坑内外侧壁漏水点或突涌通道。而超深基坑工程由于坑内外侧存在巨大压力差,更加大了该问题引发事故的概率并加剧事故后果。

综上,超深基坑地下连续墙预埋件不宜过多过密,且预埋件锚入墙体深度不能贯穿整个墙厚以避免成为渗漏通道,或者地下连续墙与地下室结构外墙采用两墙界面无连接钢筋的复合墙形式,从而无需在地下连续墙内预留与地下结构连接的埋件。

## 2.3 接缝止水

超深地下连续墙接缝止水是超深基坑重点解决的问题。由于槽段接头可能存在的夹泥夹砂、成槽垂直度偏差导致深部槽段间出现平面内外的开叉,以及开挖时变形过大引发槽段接缝张开等因素,都有可能引发接缝出现渗漏水甚至侧壁突涌等安全隐患。当基坑开挖影响范围内有渗透性强的含水层时,尤其基坑开挖面附近分布有承压含水层时,地下连续墙接缝迎土侧应设置高压旋喷桩止水。超深地下连续墙接缝高压旋喷止水桩应根据桩长及环境条件选择工艺:当高压旋喷桩桩长小于70 m时,可采用RJP工艺<sup>[10]</sup>;环境复杂时可选择微扰动的MJS工艺<sup>[11]</sup>;当超过70 m时,可采用施工能力更强的N-JET工艺<sup>[12]</sup>。

# 3 双帷幕体系

双帷幕体系,是指超深基坑在地下连续墙等围护体外侧再增设一道隔水帷幕形成双层帷幕的设计方案。双层帷幕体系具有降低工程造价和提高隔渗可靠性的优势,近年来在软土地区超深基坑工程中得到广泛应用。双层帷幕体系出于降低造价和隔渗安全不同目标,有浅墙深帷幕与深墙浅帷幕两类方案,具体如下:

## 3.1 浅墙深帷幕方案

浅墙深帷幕方案主要适用于基底及下方分布有巨厚承压含水层的软土地区超深基坑工程。“浅墙”是指地下连续墙仅根据受力和稳定性确定入土深度,“深帷幕”是指外侧隔水帷幕按照承压水控

制要求确定的相对于地下连续墙更大的入土深度,两者在入土深度上形成深浅相组合的浅墙深帷幕形式。

超深地下连续墙对施工设备、接缝止水工艺、泥浆等配套措施要求很高,其施工造价非常昂贵。采用浅墙深帷幕方案,由于基底下承压含水层为土性较好的粉土层或者砂层,按照受力与稳定性确定的地下连续墙入土深度通常较大幅度地少于按照承压水控制确定的入土深度,因此避免了采用造价昂贵的超深地下连续墙来解决承压水控制问题,而用相对经济的超深水泥土隔水帷幕替代,从而实现节约工程造价和双层帷幕双保险的目标。

上海国际金融中心<sup>[13]</sup>基坑面积48 860 m<sup>2</sup>,基坑挖深27~30 m,首次应用了浅墙深帷幕的设计方案,地下连续墙外侧设置超深TRD隔水帷幕,确保了基坑工程与周边环境的安全,并节约了造价。

## 3.2 深墙浅帷幕方案

深墙浅帷幕方案通常适用于以下情况:(1)软土地区40 m级以上超深基坑工程中,基坑受多层承压含水层影响,且从承压水控制确定所需的隔水帷幕入土深度已超越现阶段水泥土系隔水帷幕80 m最大深度的施工能力;(2)基坑基底附近分布有强透水的承压含水层,且周边环境较复杂,分析评判当地下连续墙有质量缺陷并叠加基坑变形等因素后,易引发严重的基坑侧向渗漏和突涌的风险,从而对基坑与环境安全造成较大威胁。

深墙浅帷幕方案中,地下连续墙入土深度除了应满足基坑受力与稳定性要求之外,还应对影响基坑的多层承压水进行隔断或悬挂隔水控制处理;而外侧隔水帷幕主要用于隔断基底附近对基坑安全有严重影响的承压含水层,形成隔水双保险的双层帷幕型式。

根据深墙浅帷幕双层帷幕之间不同间距可分为紧贴型、小间距型和大间距型3种型式(图1),3种双层帷幕型式可实现3种功能:

### (1) 紧贴型双层帷幕

当基坑与用地红线距离较小时,双层帷幕可采用紧贴型布置。内侧帷幕通常为地下连续墙,地下连续墙入土深度应按照基坑受力、稳定性和止水要求综合确定;外侧止水帷幕设置的主要作用是作为内侧地下连续墙开挖阶段发生渗漏时的第二道防渗防线,其入土深度应隔断坑底附近的含水层,当坑底附近含水层厚度巨厚无法隔断时,外侧止水帷幕应结合周边环境保护要求按悬挂式止水帷幕进

行设计。紧贴型双层帷幕之间间距可留设 100~200 mm,此时外侧止水帷幕可兼作为地下连续墙槽壁加固。

紧贴型双层帷幕主要功能是为超深基坑的侧向止水方面提供双重保险,进一步提高超深基坑开挖阶段侧向止水的可靠度和控制开挖阶段地下连续墙发生渗漏的安全风险隐患。

### (2) 小间距型双层帷幕

小间距型双层帷幕,是指在双层帷幕之间留设 3~5 m 间距,在此间距中针对渗漏风险大的目标承压含水层设置备用应急降水井,基坑开挖阶段一旦地下连续墙发生严重渗漏或侧向突涌时,立即启用应急降水井降低地下连续墙内外水头差,控制险情的同时也为基坑堵漏创造有利条件。内外侧帷幕的入土深度确定原则同紧贴型双层帷幕。

小间距型双层帷幕主要功能除了兼具紧贴型双层帷幕的止水双保险之外,还具备基坑开挖阶段内侧帷幕发生渗漏时启动双帷幕间应急降水井抢险功能。

上海某重大科学装置 5 号工作井超深基坑采用小间距型双层帷幕体系,地下连续墙外侧设置了一圈闭合的 69 m 深、900 mm 厚的 TRD 止水帷幕,隔断了坑底附近的⑦层第一承压含水层。双帷幕之间留设 3~11 m 的间距,在其中设置了以基底位置承压含水层为目标层的应急降水井,目前基坑工程已顺利实施完毕,实施全过程未出现渗漏险情。

### (3) 大间距型双层帷幕

以上双帷幕的应用场景主要是解决和控制超深基坑开挖时的渗漏风险。当有场地条件时,还可以进一步拓展双帷幕的应用场景和功能,即采用大间距型双层帷幕,使其除了具备控制渗漏及应急抢险功能之余,再增加其坑外降水卸压控制基坑变形的功能。

高水位软土地区超深基坑工程中,当设置双帷幕且具备场地条件时,可加大双帷幕间距,在开挖前或开挖过程中将双帷幕间坑底以上各土层地下水进行充分疏干,既可减少坑外水压力,还能通过降水提高双帷幕间土体强度而进一步减少坑外的土压力,从而实现超深基坑变形和风险的双控制,并为超深基坑支护设计方案和支护构件的优化创造条件。

大间距型双层帷幕之间的间距大小直接影响坑外降水卸压效果,其具体对应关系还需结合工程实践做进一步的理论研究。另外,由于大间距型双层

帷幕之间的范围在基坑实施过程中需持续降水卸压,当外帷幕外侧环境要求高时,外层止水帷幕的抗侧刚度要提高,以限制降水引起的水平位移。

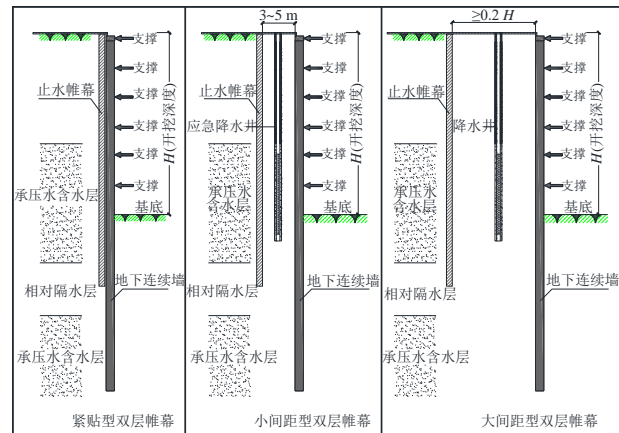


图 1 双帷幕体系的 3 种典型做法

Fig. 1 Three typical practices of double water-resisting curtain system

## 4 超深基坑内支撑体系设计

软土地区超深基坑内支撑与常规基坑主要区别在于支撑承受水平力非常大以及支撑道数多,对内支撑与竖向支撑桩柱的受力与变形控制均提出了较高的要求。

### 4.1 内支撑

软土地区超深基坑内支撑受力非常大,尤其基坑下部各道支撑在水平力作用下自身压缩量已达到不可忽略的程度,再叠加上支撑道数多的因素,支撑压缩变形已成为影响基坑总变形的主要因素之一。以上海软土地区为例,40 m 级以上超深基坑竖向需设置 9 道及以上的内支撑,下部各道支撑所承受的周边侧向水平力高达 2 000~2 500 kN/m。假设支撑长度为 100 m 时,按承载力确定的支撑截面来估算,单道支撑杆件自身压缩量可达到 30~40 mm 量级,已占到按照环境保护等级二级基坑总变形 120 mm 允许值(开挖深度的 3%,开挖深度按 40 m 计算)的 20%~30%。

综合上述因素,从控制基坑变形和保护周边环境的角度出发,软土地区 40 m 级以上超深基坑内支撑设计中应关注如下几个方面:

(1) 受力直接、均匀的支撑平面布置。考虑到超深基坑支撑受力大的特点和基坑变形控制要求,支撑平面布置应以受力直接、避免多次转换,受力均匀、避免集中为原则。对于长条形基坑,可采用在短边布置对撑、两端布置角撑的形式;对于方形或不规则形状的基坑,可优先考虑采用十字正

交的支撑布置形式。这种布置形式一方面支撑整体刚度大,利于控制基坑变形;另一方面可实现各支撑杆件受力均匀,避免出现桁架式对撑受力过于集中而产生较大压缩变形。

(2) 基于受力与变形控制合理布置支撑竖向间距。支撑竖向布置应在兼顾拆撑工况的前提下,根据竖向各道支撑的受力大小以及地层分布,合理确定各道支撑的竖向间距。对于侧向压力大的基坑下部位置以及软弱地层位置,支撑间距可适当加密;对于侧向压力小的基坑浅部以及低压缩性地层的位置,支撑竖向间距可适当放大。

(3) 低压缩和低收缩的支撑构件设计。支撑构件应围绕减少支撑压缩和收缩变形为原则进行设计。不同于常规基坑支撑截面按照荷载与承载力相匹配的确定原则,超深基坑的内支撑设计除了应满足承载力要求之外,还应以变形控制为原则,以加大支撑刚度及低压缩为目标,综合确定支撑截面尺寸和设计强度,并优化支撑混凝土的配合比及采用无收缩或低收缩混凝土,减少支撑的收缩量。

(4) 主动控制变形的支撑轴力伺服系统。前面几点均为被动控制基坑变形的措施,而软土超深基坑变形的影响因素多且复杂,当基坑周边环境复杂需要严格控制基坑变形时,应采取主动控制变形的技术措施。如在混凝土支撑中应用可主动控制变形的轴力伺服系统。当基坑形状适合布置钢支撑时,竖向布置上采用混凝土支撑与钢支撑相结合的方式,以发挥钢支撑快挖快撑优势,同时钢支撑也可采用轴力伺服系统。目前钢支撑常用 $\Phi 609 \times 16$ 和 $\Phi 800 \times 20$ 两种钢管支撑,在超深基坑中应用时其承载能力仍相对较小,还应继续开发更大截面、更高承载力的钢支撑。

#### 4.2 竖向支撑桩柱

软土地区超深基坑竖向支撑道数多且支撑截面大,仅支撑系统自重荷载就相当可观,当首道支撑兼做施工栈桥时,更是对钢立柱和立柱桩竖向支撑的承载力提出了更高的要求。经对比(表1),当承载力要求较高时,钢管混凝土柱与传统角钢格构柱相比,在用钢量及承载力上都具有明显优势。因此,对于设置6道及以上支撑的超深基坑,钢立柱宜优先考虑采用承载力高且造价低的钢管混凝土柱。

立柱桩建议采用桩端后注浆或桩端与桩侧联合注浆的灌注桩或扩底灌注桩,以满足超深基坑对竖向支撑体系的承载力及变形要求。

表1 角钢格构柱与钢管混凝土柱技术参数对比

Table 1 Comparison of technical parameters between angle steel lattice columns and CFST columns

钢立柱类型	钢立柱规格	延米重/ (kg/m)	承载力 设计值/kN
角钢格构柱	4L200×24/ 截面 550 mm	399.5	5 850
钢管混凝土柱	$\Phi 550 \times 16$ /内填 C40	210.7	8 035

## 5 超深隔水帷幕及地基加固

超深基坑对隔水帷幕及地基加固技术也提出了更大深度、更高强度的要求,传统的单轴、双轴及三轴水泥土搅拌桩由于施工深度能力限制,已无法适应超深基坑需要。目前超深基坑工程中施工深度较大的水泥土系隔水帷幕和地基加固工艺如表2所示。

表2 超深基坑适用的水泥土系隔水帷幕和地基加固工艺  
Table 2 Cement-soil water-proof curtain and foundation reinforcement techniques suitable for super-deep foundation pit

类型	桩径/mm	施工 深度/m	水泥 掺量/%	强度/ MPa	主要应用 场景
超深三轴 搅拌桩	850~1 000	50	$\geq 20$	0.5	槽壁加固 地基加固
四轴 搅拌桩	850	45	13~18	0.8	槽壁加固 地基加固
TRD 工法	550~1 200	80	$\geq 20$	0.8	超深帷幕
CSM 工法	700~1 200	80	$\geq 20$	0.8	超深帷幕
RJP	1 600~3 000	70	$\geq 40$	1.0	墙缝加固 深层加固
MJS	$\leq 3 600$	70	$\geq 40$	1.0	墙缝加固 深层加固
N-Jet	$\leq 8 000$	120	$\geq 35$	1.0	墙缝加固 深层加固

表2所述的隔水帷幕及地基加固工艺在软土地区40 m级以上超深基坑中适用条件概括如下:

超深三轴搅拌桩与四轴搅拌桩,可施工深度达45~50 m,主要应用于超深基坑中地下连续墙槽壁加固以及基坑被动区加固。此外四轴搅拌桩具备微扰动施工的能力,邻近敏感环境条件下也可适用。

TRD工法和CSM工法施工深度大,适应地层条件广,其构建的等厚度水泥土搅拌墙隔水可靠性高,近年来作为超深隔水帷幕在基坑工程中得到了大量的应用。

RJP、MJS和N-JET均为超高压喷射注浆工法,但其施工深度、成桩直径以及对环境扰动程度有所

不同。3 种工法主要应用在地下连续墙接缝加固、被动区和局部深坑加固、基坑封底加固等场合中,特殊情况下也可用作连续的隔水帷幕。

## 6 深层承压水控制

随着基坑深度加深,以前未触及的深层承压水问题也开始出现,而其带来的降隔水和环境影响控制等问题更为复杂。受承压水影响的超深基坑技术处理方法较多采用隔断、悬挂式帷幕、抽灌一体化三类方案<sup>[14]</sup>。三类方案在造价上存在较大差异,对周边环境影响程度也不同。实际工程中可结合基坑规模、环境条件以及承压水分布情况等综合因素具体分析选用。

### 6.1 隔断

隔断方案一般适用于基坑坑底已接近或揭穿承压含水层,且基坑周边环境有较高保护要求的情况。对超深基坑深层承压水采用隔断处理方案有如下两种方式(图 2):

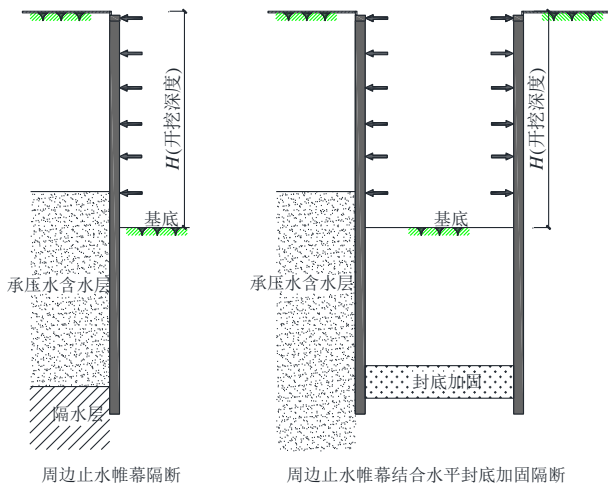


图 2 深层承压水隔断的两种典型做法

Fig. 2 Two typical methods to cut off deep confined water

(1) 设置超深落底式帷幕隔断深层承压含水层。如上海苏州河段深层排水调蓄管道系统工程中的苗圃竖井基坑工程,基坑直径 30 m,挖深达 56.3 m,坑底之上分布有透水性强、涌量大、降水影响范围广的上海第一承压含水层⑦层,坑底下是上海第二承压含水层⑨层粉细砂-中粗砂层(层底埋深约 100 m)。为控制⑦层和⑨层两层承压水问题,基坑周边采用入土深度达 103 m 的 1.5 m 厚地下连续墙进行隔断处理。

(2) 设置悬挂式帷幕结合水平封底加固隔断深层承压含水层。当基坑下部深层承压含水层巨厚,超越了现有帷幕的施工能力或者采用超深帷幕施工难度和代价过高,同时基坑面积较小适合水平封底加固时,也可采用竖向悬挂式帷幕与水平封底

加固相组合围成“木桶”形方式隔断承压含水层。基坑内满堂水平封底加固的作用相当于在基底下构建了一层水泥加固土的相对隔水层,降低了目标承压含水层顶标高。水平封底加固厚度一般取 3~5 m,封底加固底标高应通过承压水突涌稳定性计算确定,封底加固底至坑底的上覆土重应能抵抗其下方承压水的顶托力。上海市轨道交通 14 号线歇浦路车站基坑下部分布有⑦和⑨两层连通的巨厚承压含水层,周边环境要求高,无法采用超深帷幕进行隔断,因此采用周边地下连续墙结合基坑下部 N-JET 水平封底加固方式进行隔断处理<sup>[15]</sup>。

### 6.2 悬挂式帷幕

悬挂式帷幕方案一般适用于承压含水层巨厚无法采用帷幕隔断,而基坑面积较大以致水平封底加固造价过于昂贵的情况。其具体设计思路为止水帷幕伸入目标承压含水层一定深度,对坑内的减压井形成一定长度的悬挂遮拦,加长坑外同层承压水向坑内补给的渗流路径,从而减少坑外承压含水层的降深和地层压缩,保护周边环境。表 3 为采用悬挂式帷幕已成功实施的基坑案例。

表 3 采用悬挂式帷幕已成功实施的基坑案例

Table 3 Successfully implemented projects of hanging curtains

项目	基坑面积/m <sup>2</sup>	挖深/m	目标承压层/层	帷幕比减压井深/m	开挖至基底时坑内外承压水降深比
上海黄浦区文化中心	5 030	24~25	7	10	8 : 1
上海市黄浦区党校	1 710	17	7	9	12 : 1
上海国际金融中心	50 000	27~32	7	9	2.5 : 1
上海某重大科学装置 5 号井	4 535	42~45.5	9	7	13 : 1

前文所述的上海国际金融中心基坑开挖深度为 27~30 m,基底已进入上海第一承压含水层⑦层,且与⑨层和⑪层第二、三承压含水层相互连通,形成总厚度超 100 m 的巨厚承压含水层组。该基坑针对承压含水层采用了悬挂式帷幕的方案,经过抽水试验及降水影响分析,采用 53 m 深 TRD 隔水帷幕对 45 m 深减压井形成了悬挂隔水,取得了良好的承压水控制效果,如图 3 所示。

止水帷幕对减压井悬挂遮拦长度根据周边环境要求,通过开展抽水试验结合降水数值模拟分析进行综合确定。悬挂式帷幕方案实现的承压水控制效果受很多因素影响,其中基坑挖深、承压含

水层厚度、分布及水文地质参数、设计降深是定量参数，而基坑降水面积、止水帷幕入土深度、降水井数量及深度等则是变量参数。如何合理化确定变量参数，以最小代价实现最佳的承压水控制效果是该类方案的核心问题。经工程实践表明，在相同目标降深要求下，采取合理措施将基坑总涌水量控制得越小，坑内外降深比（基坑内外承压水头下降的比值）将越大，对周边环境保护更好。

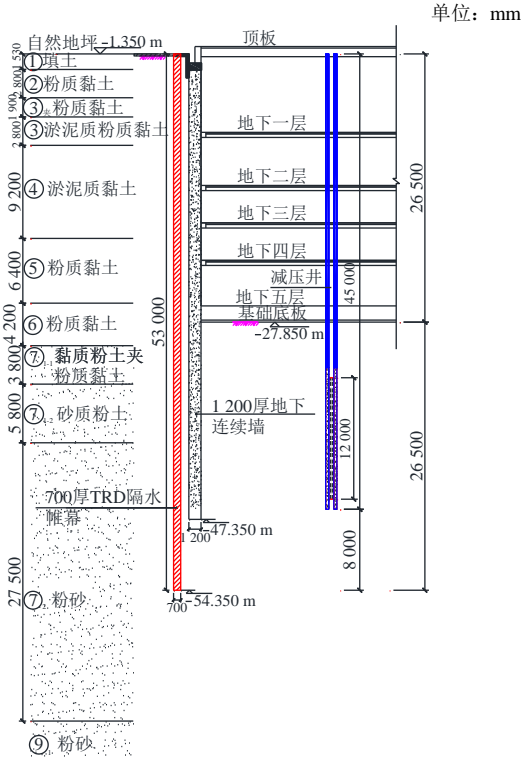


图3 上海国际金融中心悬挂式隔水帷幕剖面

Fig. 3 Profile of the hanging water-proof curtain of Shanghai International Financial Center

悬挂式帷幕基坑中可采用以下方式来提高承压水控制效果，减少对周边环境的影响：

(1) 加大止水帷幕对减压井的遮拦深度，增加承压水坑外向坑内补给的渗流路径，减少基坑涌水量，提高坑内外降深比。

(2) 减少减压井长度、增加井数、加密井间距，实现以更少的基坑涌水量达到目标降深。

(3) 同等条件下基坑面积越小，悬挂式帷幕实现的坑内外承压水降深比越大。对超大基坑进行化大为小的合理分区，减少基坑一次性降水面积，也可实现更优承压水控制效果。

除了上述技术措施之外，当周边环境变形控制标准要求很高时，还可结合坑外回灌措施减少承压水降深以满足环境保护要求。

### 6.3 抽灌一体化

抽灌一体化方案一般应用于超深基坑基底以

下深层承压水处理中，可用于以下两种情况：

(1) 当深层承压水对超深基坑突涌稳定性略不足，设计降深需求比较小，且经评估敞开降压对周围环境影响在允许范围之内。比如前文所提的苗圃竖井基坑工程，更深层还分布有第⑩<sub>A</sub>层承压含水层，对基坑具有抗突涌风险，但其设计降深在2 m之内，因此对该深层承压含水层未采取帷幕进行隔断或悬挂处理，而采取敞开式减压的处理方案。

(2) 当深层承压含水层渗透性一般、涌水量小、降水漏斗范围不大，而且基坑实施阶段降压周期较短时，经计算分析和综合评估，采用坑内降压、坑外同步回灌的抽灌一体化技术，可将降压对周边环境的影响控制在允许范围之内。比如苏州中南中心地下6层基坑面积约23 000 m<sup>2</sup>，普遍区挖深27.7 m，建筑高度499 m的超高层塔楼厚板区挖深32.4 m，电梯井区挖深36.7 m。基底下⑪层承压含水层埋深较深，对基坑普遍区无突涌风险，塔楼厚板区设计降深约8 m，电梯井位置设计降深约15 m。按照基坑稳定性确定的入土深度63 m的地下连续墙已将上部的⑤层与⑨层承压含水层隔断。对于⑪层承压含水层，基于该承压含水层单井涌水量低、影响范围小、短期抽降地层沉降小的抽水试验结论，以及塔楼厚板区与重点保护对象地铁1号线隧道距离较远，已超过90 m等有利条件，经过计算分析最终确定对⑪层采取无帷幕抽灌一体化的承压水控制技术，见图4。实施结果证明该方案很好的保护了地铁隧道及周边环境，且相比隔断方案大幅降低施工难度及节约造价和工期。

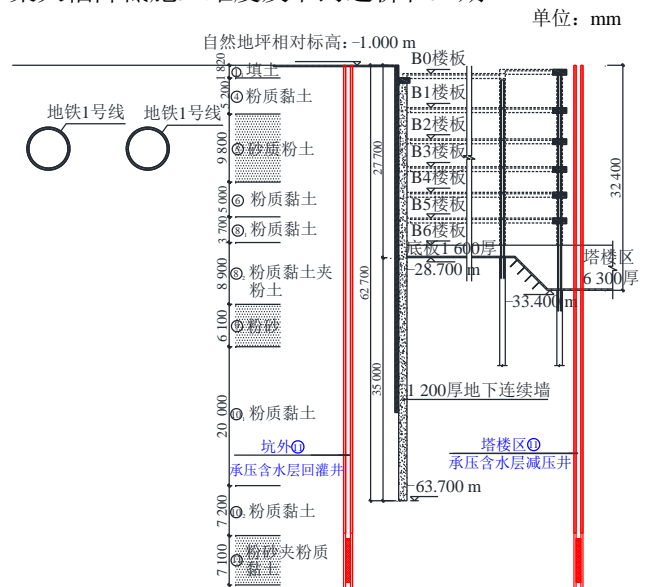


图4 苏州中南中心⑪层承压含水层抽灌一体化剖面

Fig. 4 Profile of integrated pumping and irrigation of confined aquifer at layer ⑪ of Suzhou Zhongnan Center

## 7 超深基坑特殊技术问题

软土地区深基坑随着挖深增加,侧向水土压力大幅增加,基坑暴露时间更长,一些影响基坑变形和风险的次要因素逐渐成为不可忽视因素甚至主要因素。对于软土地区超深基坑,以下两个方面技术问题需引起重视,并在设计与实施中采取技术对策予以控制。

### 7.1 工程桩空孔回填处理应密实

深基坑工程中往往会布置有大量工程桩,工程桩成孔施工时会形成桩顶设计标高之上的空孔段,空孔段若不回填或回填质量不好,会对基坑被动区土体造成扰动和土体损失,削弱基坑开挖之前被动区土体抗力,进而影响基坑变形的控制效果。

常规基坑工程挖深不大且工程桩空孔率(工程桩总空孔面积与基坑面积之比)不高,此因素对基坑开挖变形影响尚不明显,但随着挖深增加会逐渐成为基坑变形的重要因素之一。软土地区 40 m 级以上超深基坑往往伴随密集工程桩,尤其主体为纯地下工程时,更需要设置密集抗拔桩来抵抗巨大的地下水浮力,从而形成较大的空孔率,若工程桩空孔段未做密实回填,基坑最终实际变形可能会大幅度高于预估的计算变形。

因此,针对软土地区 40 m 级以上超深基坑,应对工程桩空孔段提出回填要求,尤其是对被动区范围内的工程桩空孔段更应密实回填,如可采用低标号素混凝土或者水泥砂浆进行回填等措施,确保被动区土体在开挖阶段提供可靠的抗力,减少基坑变形。

### 7.2 坑内降水对基坑变形的影响

郑刚等<sup>[16-17]</sup>的研究表明抽降基坑潜水会引起支护结构明显的变形。高地下水位软土地区超深基坑实践也揭示了该现象:上海某挖深近 40 m 的超深基坑,第一道支撑施工后,基坑开挖前对坑底以上地层进行 50 余天的疏干降水,在此期间地下连续墙发生约 5 cm 的侧向变形,第一道支撑下方土体发生约 12 cm 的脱开沉降;邻近的挖深 45 m 基坑,开挖至接近坑底深度时开启抽降坑底以下深层承压含水层的前几天内,对应深度位置的地下连续墙发生日均 1~2 mm 向坑内的侧向变形。

坑内降水引起支护结构变形的原理同地基处理中用于加速地基土固结沉降的排水预压法,两者主要区别在于荷载作用方向水平与竖向的区别。周边围护体封闭隔断坑内外水力联系之后,坑内降水时围护体内外会形成侧压力差,在坑外侧压力作用下,坑内持续降水将加速坑内土体的压缩固结,从

而导致围护体产生侧向变形。

软土地区超深基坑坑内降水引起基坑变形量总值比较可观,对此情况应引起充分重视并有相应的预案。坑内降水是基坑实施的必备工序,因其引发的围护体变形也难以避免,但从基坑风险管理控制角度建议软土地区超深基坑在第一道支撑施工后、开挖前进行充分的预降水,一方面可将该风险在开挖前提前释放,开挖前围护体发生变形的风险更易于应对和控制,以降低后续开挖阶段的风险;另一方面,开挖之前对坑内土体进行降水疏干,让其提前固结沉降提高强度,利于控制开挖阶段的围护体变形。

## 8 结 论

软土地区 40 m 级以上超深基坑工程,面临侧向水土侧压力大幅增加、围护渗漏风险增大、对围护工艺提出更深和精度更高等一系列新技术问题。本文结合超深基坑面临的技术问题以及类似工程的设计实践,对超深基坑设计的关键技术做了初步总结,涵盖总体选型、超深地下连续墙、双帷幕体系、内支撑体系、超深止水帷幕及地基加固、深层承压水控制以及特殊技术问题等方面。本文可为软土地区类似超深基坑工程的设计与实施提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 王卫东,徐中华. 基坑工程技术新进展与展望[J]. 施工技术, 2018, 47(6): 53-65.  
WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. New progress and expectation of foundation excavation engineering technology[J]. Construction Technology, 2018, 47(6): 53-65.
- [2] 马丽丽,王樟群,许爱国,等. 人民广场 220 kV 地下变电站开挖阶段深层井点降水[J]. 上海建设科技, 1995(4): 20-21.  
MA Li-li, WANG Zhang-qun, XU Ai-guo, et al. Deep well point dewatering in excavation stage of People's Square 220 kV underground substation[J]. Shanghai Construction Science and Technology, 1995(4): 20-21.
- [3] 王卫东,朱伟林,陈峥,等. 上海世博 500 kV 地下变电站超深基坑工程的设计、研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 564-576.  
WANG Wei-dong, ZHU Wei-lin, CHEN Zheng, et al. Design, study and practice of deep cylindrical excavation of Shanghai World Expo 500 kV Underground Transmission Substation Project[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 564-576.
- [4] 王卫东, 徐中华, 宗露丹, 等. 软土地区 56 m 深圆形基坑的优化设计与实践[J]. 建筑结构, 2022, 52(10): 1-10.  
WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, et al. Optimal design and practice of a 56 m ultra-deep circular excavation in soft soils[J]. Building Structure, 2022, 52(10): 1-10.
- [5] 徐中华, 李靖, 翁其平, 等. 超深圆形基坑计算分析方法及工程应用[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 13-20.  
XU Zhong-hua, LI Jing, WENG Qi-ping, et al. Analysis method of ultra-deep circular excavation and its application[J]. Construction Technology, 2022, 51(1): 13-20.
- [6] 王晓鹏. 苏州河深隧调蓄工程试验段建造管理关键技术[J]. 中国市政工程, 2022(3): 30-32, 134.  
WANG Xiao-peng. Key technologies for construction management of Suzhou creek deep tunnel regulation & storage project test section[J]. China Municipal Engineering, 2022(3): 30-32, 134.
- [7] 贾坚, 谢小林, 翟杰群, 等. “上海中心”圆形基坑明挖顺作的安全稳定和控制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 370-376.  
JIA Jian, XIE Xiao-lin, ZHAI Jie-qun, et al. Safety and stability control of circular foundation pit of Shanghai Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 370-376.
- [8] 翁其平, 王卫东, 周建龙. 超深圆形基坑逆作法“两墙合一”地下连续墙设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5): 188-194.  
WENG Qi-ping, WANG Wei-dong, ZHOU Jian-long. Design of diaphragm wall of an ultra-deep cylindrical excavation constructed by top-down method[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(5): 188-194.
- [9] 张哲彬. 超深地下连续墙套铣接头施工技术[J]. 建筑施工, 2013, 35(4): 273-275.  
ZHANG Zhe-bin. Construction technology for connector cutting of super deep diaphragm walls[J]. Building Construction, 2013, 35(4): 273-275.
- [10] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 超高压喷射注浆技术标准: DG08—2068—2019[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.  
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. Technical Code for Ultra-High Pressure Jet Grouting: DG08—2068—2019[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2019.
- [11] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 全方位高压喷射注浆技术标准: DG/TJ08—2289—2019[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.  
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. Technical Specification for Omnibearing High Pressure Jet Grouting: DG/TJ08—2289—2019[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2019.
- [12] 杜云龙, 姚燕明, 欧祝明, 等. N-JET 超级旋喷桩在深基坑承压水控制中的应用[J]. 施工技术, 2020, 49(1): 11-15.  
DU Yun-long, YAO Yan-ming, OU Zhu-ming, et al. Application of N-JET super jet grouting pile in confined water control of deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2020, 49(1): 11-15.
- [13] 王卫东, 徐中华, 宗露丹, 等. 上海国际金融中心超深大基坑工程变形性状实测分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(18): 126-135.  
WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, et al. Field measurement and analysis on deformation behavior of extreme deep and large foundation pit engineering of Shanghai International Financial Center[J]. Building Structure, 2020, 50(18): 126-135.
- [14] 翁其平, 王卫东. 深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 343-348.  
WENG Qi-ping, WANG Wei-dong. Design and application of control of confined groundwater in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 343-348.
- [15] 王海俊, 赵永强, 杨栓. 超高压喷射搅拌成桩工法水平封底隔断承压水的施工[J]. 建筑施工, 2022, 44(1): 15-17.  
WANG Hai-jun, ZHAO Yong-qiang, YANG Shuan. Construction of horizontal bottom sealing of confined water by ultra-high pressure jet mixing pile construction method[J]. Building Construction, 2022, 44(1): 15-17.
- [16] 郑刚, 曾超峰. 基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2153-2163.  
ZHENG Gang, ZENG Chao-feng. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2153-2163.
- [17] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24.  
ZHENG Gang, ZHU He-hua, LIU Xin-rong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24.