

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.072



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 深基坑注水与水下开挖设计计算方法

邹志炎<sup>1</sup>, 刘盛林<sup>2</sup>, 张逸博<sup>1</sup>, 傅旭东<sup>1</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 中交二公局第一工程有限公司, 武汉 430055)

**摘 要:** 注水与水下开挖是一种新型基坑开挖方法, 用于解决基坑地下水与江河水有稳定联系时传统的坑外降水与坑内排水方法无法实施的问题。提出深基坑注水与水下开挖的设计计算方法, 结合钢板桩围堰深基坑工程, 制定注水与水下开挖方案, 建立数值模型研究深基坑先降水形成旱地工作条件开挖、再注水进行水下开挖、水下浇筑封底混凝土后再降水时所对应的支护结构受力与变形规律, 并对注水高度进行优化。结果表明: 先降水形成旱地工作条件时最大降水深度取决于坑底土体抗流砂、管涌的稳定性, 开挖深度从 2 m 增加至 7 m 时, 支护结构水平位移增加了 53.6%, 坑底塑性隆起量的最大值逐渐增大至 59.0 mm; 再注水进行水下开挖时, 增加注水高度能有效减小坑底土体的隆起变形及支护桩的水平位移, 临界注水高度为 9 m, 注水高度超过该临界值后, 其抑制坑底和支护桩变形的效果会减弱。封底混凝土厚度取决于其抗浮稳定性和强度, 钢板桩嵌固深度取决于水下浇筑混凝土后再降水工况下支护结构的整体稳定性。

**关键词:** 深基坑; 钢板桩; 注水高度; 水下开挖; 数值模拟

**中图分类号:** TU473.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0028-09

## Calculation method of deep foundation pit water injection and underwater excavation design

ZOU Zhiyan<sup>1</sup>, LIU Shenglin<sup>2</sup>, ZHANG Yibo<sup>1</sup>, FU Xudong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 2. CCCC Second Public Bureau First Engineering Co, Wuhan 430055, P. R. China)

**Abstract:** Water injection and underwater excavation is a new method of foundation excavation. It is used to solve the problem that traditional methods of off-pit precipitation and in-pit drainage cannot be implemented when there is a stable connection between groundwater in the foundation pit and river water. The design calculation method of deep foundation pit injection and underwater excavation is proposed. Combined with the deep foundation pit project of steel sheet pile cofferdam, a water injection and underwater excavation scheme was developed, and a corresponding numerical model was established to study the force and deformation pattern of the support structure corresponding to the deep foundation pit firstly precipitated to form dryland working conditions for excavation, then injected water for underwater excavation, and then precipitated after underwater pouring of sealing concrete. The water injection height has also been optimized. The conclusions are as follows:

**收稿日期:** 2023-03-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(51978540)

**作者简介:** 邹志炎(1998-), 男, 主要从事桩基工程研究, E-mail: zhiyanzou@whu.edu.cn。

傅旭东(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xdfu@whu.edu.cn。

**Received:** 2023-03-10

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978540)

**Author brief:** ZOU Zhiyan (1998-), main research interest: pile foundation engineering, E-mail: zhiyanzou@whu.edu.cn.

FU Xudong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xdfu@whu.edu.cn.

First precipitation to form dryland when the maximum depth of precipitation depends on the stability of the soil at the bottom of the pit against flowing sand and pipe surges. When the excavation depth increases from 2 m to 7 m, horizontal displacement of support structure increased by 53.6%, the maximum value of plastic uplift at the bottom of the pit gradually increases to 59.0 mm. When re-injecting water for underwater excavation, increasing the height of water injection can effectively reduce the uplift deformation of the soil at the bottom of the pit and the horizontal displacement of the support pile, the critical height of water injection is 9 m. When the water injection height exceeds the critical value, the effect of inhibiting the deformation of pit bottom and support piles would be weakened. The thickness of the sealing concrete depends on its floating stability and strength. The embedded depth of steel sheet piles depends on the overall stability of the support structure under the precipitation conditions after the concrete is placed underwater.

**Keywords:** deep foundation pit; steel sheet pile; water injection height; underwater excavation; numerical simulation

随着中国高速铁路网、高速公路网的不断完善,跨江越湖的桥梁越来越多,在岸边陆地修建桥墩的明挖基础工程也逐渐增多。这些工程常采用降水开挖法、水下开挖法两种方法。降水开挖法能提供旱地工作条件,设置内支撑保证支护结构的稳定性,但当基坑地下水与江水或河水有稳定的水力联系时,坑外降水与坑内排水的难度极大,甚至难以实现,且基坑开挖到一定深度时坑内水位小于坑外水位较多,坑底容易发生管涌和流砂,地面也会发生沉降<sup>[1-6]</sup>。水下开挖法中坑内水位与坑外水位一般相差不大,保证了坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性,但在开挖过程中无法设置内支撑,浇筑封底混凝土再降水后,支护结构的稳定性难以达到规范要求。这两种传统的深基坑开挖方法均难以同时保证支护结构的稳定性和坑底地基土抗流砂、管涌稳定性。为解决这一问题,近年来探索了基坑注水与水下开挖这一基坑开挖新方法,为深基坑地下水问题的处理开辟了新途径<sup>[7-8]</sup>。

基坑注水与水下开挖方法首先需要插打钢板桩,修建钢板桩围护结构,再进行基坑开挖。在基坑开挖深度较小时,通过坑内降水保证旱地施工条件;当基坑继续开挖至一定深度时,停止降水并向坑内注水,进行水下挖土;当开挖至设计深度后,水下浇筑封底混凝土;在封底混凝土达到设计强度后,再进行抽水,以形成旱地施工条件,进行明挖基础及桥墩的建设。该方法结合了降水开挖法能设置内支撑、造价低以及水下开挖能保证坑底地基土抗流砂、管涌稳定性的优点,解决了降水开挖降水困难、坑底容易发生管涌流砂和水下开挖支护结构失稳的问题,在岸边陆地明挖基础工程中具有良好的应用前景。

此方法中,钢板桩的嵌固深度 $t$ 、封底混凝土厚度 $x$ 和最大降水深度 $h'$ 与注水高度 $H$ 这4个指标决定了坑底地基土体抗流砂、管涌稳定性以及支护结

构的稳定性,需要对其进行进一步研究。钢板桩的嵌固深度 $t$ 不仅会影响支护结构的整体稳定性、受力与变形,还会影响坑底地基土的渗透变形。因此, $t$ 需满足整体稳定性和抗隆起稳定性要求<sup>[9]</sup>。汪新立<sup>[10]</sup>认为,对于多层支撑结构,可以采用等值梁法计算 $t$ ;多层支撑支护体系中若支护结构具有足够的刚度,则只需要满足抗隆起要求。封底混凝土厚度及其与桩壁的粘结强度将影响封底混凝土的抗浮稳定性和强度。董广文<sup>[11]</sup>、崔清强<sup>[12]</sup>、Yang等<sup>[13]</sup>分别采用理论计算、模型试验、数值模拟的手段,提出了封底混凝土厚度的计算方法。Chen等<sup>[14]</sup>通过理论计算提出了一种考虑封底混凝土与支护结构粘结力强度的封底混凝土厚度计算方法,并认为封底混凝土与支护结构的粘结力需要依据不同的支护结构材料折减。降水深度是指降水后坑外水位与坑内水位的水位差。最大降水深度 $h'$ 是指当基坑进行降水开挖、形成旱地施工条件时,坑底土满足渗透变形稳定性所对应的最大降水深度。达到该深度后,若基坑继续向下开挖,需向坑内注水及水下挖土,以避免发生管涌、流砂。注水高度 $H$ 是指注水后坑内注水水位与最大降水水位的水位差,注水水位可用 $\Delta h$ 来确定, $\Delta h$ 定义为坑外水位与坑内注水水位的水位差。李博<sup>[15]</sup>研究了开挖至坑底,坑内水位分别小于、等于、大于坑外水位时基坑支护结构的变形,结果表明,坑内水位越高,支护结构的变形越小,即使坑内水位高于坑外水位,支护结构的变形仍在减小。

上述研究主要结合实际工程对降水开挖方法中嵌固深度、水下封底混凝土厚度、基坑支护结构变形的计算方法进行了分析,但没有对基坑注水与水下开挖工法的设计计算方法进行系统研究。针对上述研究中的不足,笔者对基坑注水与水下开挖方法中钢板桩嵌固深度 $t$ 、封底混凝土厚度 $x$ 、最大降水深度 $h'$ 与注水高度 $H$ 这4个指标进行研究,并

将相关成果成功运用于潜江汉江大桥主墩深基坑锁扣钢板桩围护结构的施工中;通过建立基坑降水分步开挖、注水水下开挖的有限元计算模型,研究基坑支护结构的受力与变形规律,并对注水高度进行优化。

## 1 基坑注水与水下开挖方案设计计算

### 1.1 基坑注水与水下开挖参数的确定

基坑注水与水下开挖法主要适用于在岸边陆地修建深基坑时基坑地下水与江水或河水有稳定的水力联系且土层为砂土的情况。设计计算时需保证支护结构的整体稳定性,坑底地基土的抗隆起、抗流砂、管涌稳定性以及封底混凝土的抗浮稳定性。其中,支护结构整体稳定性取决于钢板桩的嵌固深度 $t$ ;坑底地基土的抗隆起稳定性取决于钢板桩的嵌固深度 $t$ 、土层的物理力学特性及注水高度 $H$ ;坑底地基土的抗流砂、管涌稳定性取决于最大降水深度 $h'$ 和注水高度;封底混凝土的抗浮稳定性取决于封底混凝土的厚度 $x$ 。综上,在基坑注水与水下开挖时,钢板桩的嵌固深度 $t$ 、封底混凝土厚度 $x$ 、最大降水深度 $h'$ 与注水高度 $H$ 四个参数的确定对支护结构的稳定性和施工安全性至关重要。

#### 1.1.1 嵌固深度 $t$

基坑注水与水下开挖时,为确定钢板桩的嵌固深度 $t$ ,需要考虑以下两种工况。

工况 1:坑内注水后水下挖土至开挖设计面处,此时坑内注水对钢板桩的变形有抑制作用,但开挖深度达到最大,为坑底地基土抗隆起稳定性的最不利条件,如图 1 所示。

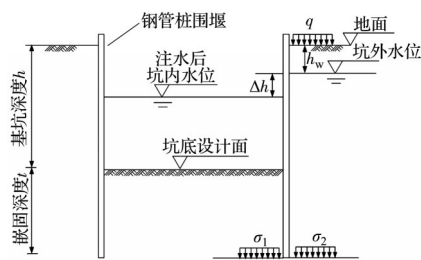


图 1 钢板桩嵌固深度设计计算

Fig. 1 Design of steel sheet pile embedded depth

工况 2:混凝土封底后坑内抽水,此时封底混凝土形成强度,保证了坑底地基土抗隆起稳定性,但抽水后坑内注水对钢板桩变形的抑制作用消失,导致钢板桩的受力与变形增加,支护结构整体稳定性下降,为支护结构稳定性的最不利条件。

由此可知,满足基底抗隆起稳定性所需的嵌固深度 $t_1$ 取决于工况 1,满足钢板桩整体稳定性所需的嵌固深度 $t_2$ 取决于工况 2,可选取两种工况中最大的

$t$ 值作为钢板桩所需的嵌固深度 $t$ 。

#### 1) 嵌固深度 $t_1$

基于规范<sup>[16]</sup>中坑底土的抗隆起稳定性验算方法,提出嵌固深度 $t_1$ 的计算式,见式(1)~式(6)。

$$\frac{\sigma_1 N_q + c N_c}{\sigma_2} \geq K \quad (1)$$

其中

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi \quad (2)$$

$$N_q = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) e^{\pi \tan \varphi} \quad (3)$$

式中: $K$ 为抗隆起安全系数,安全等级为一级、二级、三级时, $K$ 分别不应小于 1.8、1.6、1.4; $c$ 为土体黏聚力; $\varphi$ 为土体内摩擦角; $N_c$ 、 $N_q$ 为承载力系数; $e$ 为自然常数; $\sigma_1$ 为坑内钢板桩底面高程处的土压力,可由式(4)计算; $\sigma_2$ 为坑外钢板桩底面高程处的土压力,可由式(5)计算。

$$\sigma_1 = \gamma'_3 t_1 + \gamma_0 (h - h_w - \Delta h) \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \gamma_1 h_w + \gamma_2 (h + t_1 - h_w) + q \quad (5)$$

式中: $\gamma'_3$ 为坑内开挖面以下土的浮重度, $\text{kN/m}^3$ ; $\gamma_0$ 为水的重度, $\text{kN/m}^3$ ; $h_w$ 为坑外水位的深度, $\text{m}$ ; $h$ 为基坑设计深度, $\text{m}$ ; $\gamma_1$ 为坑外水面以上土的天然重度, $\text{kN/m}^3$ ; $\gamma_2$ 为坑外水面以下土的浮重度, $\text{kN/m}^3$ ; $q$ 为地面均布荷载, $\text{kPa}$ ; $\Delta h$ 为坑外水位与坑内注水水位的水位差, $\text{m}$ 。

将式(4)、式(5)代入式(1),可得嵌固深度 $t_1$ 需要满足的式(6)。

$$\frac{\gamma'_3 t_1 N_q + \gamma_0 (h - h_w - \Delta h) N_q + c N_c}{\gamma_1 h_w + \gamma_2 (h + t_1 - h_w) + q} \geq K \quad (6)$$

#### 2) 嵌固深度 $t_2$

混凝土封底后坑内抽水时,钢板桩嵌固深度的设计计算方法与常规降水开挖设计计算方法一致,考虑内支撑作用,计算时将其看作多跨梁,直接采用等值梁法进行计算,见式(7)。

$$t_2 = 1.2(u + t_0) \quad (7)$$

式中: $u$ 为基坑底部至土压力零点的距离, $\text{m}$ ; $t_0$ 为土压力零点至弯矩零点的距离, $\text{m}$ 。

#### 1.1.2 混凝土厚度 $x$

基坑底部采用混凝土封底并抽干水后,封底混凝土底面将受到因水头差而产生的向上浮力,封底混凝土可能被水浮起,或者向上挠曲而折裂,因此,需要有足够的厚度来保证其旱地工作的安全。

作用在封底混凝土底面的浮力主要由封底混凝土的自重及封底混凝土与钢板桩的粘结力来平衡。为平衡浮力,封底混凝土的厚度需要满足式(8)~式(11)。

$$k = \frac{G + f}{F} \quad (8)$$



$$F = \gamma_0 h s_1 \quad (9)$$

$$f = \mu x C \quad (10)$$

$$G = \gamma_4 x s_1 \quad (11)$$

式中:  $k$  为抗浮安全系数, 不小于 1.1;  $G$  为封底混凝土的自重, kN;  $f$  为封底混凝土与钢板桩围堰的粘结力, kN;  $F$  为封底混凝土底面受到的浮力;  $s_1$  为封底混凝土的底面积,  $\text{m}^2$ ;  $C$  为围堰的周长;  $\mu$  为单位面积混凝土与钢板桩的粘结力, kPa, 水下浇筑混凝土取 380 kPa<sup>[11]</sup>;  $\gamma_4$  为混凝土的重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

### 1.1.3 最大降水深度 $h'$

由于难以在水下设置内支撑结构, 因此, 需首先在内坑降水与分步开挖, 以保证各道内支撑设置的旱地工作条件。

分步降水开挖过程中, 一般将坑内水位降至分步开挖面以下 0.5 m, 最大的降水开挖深度  $h'$  取决于坑底土抗流砂、管涌的稳定性。降水开挖时基坑渗流是二维的, 但可根据最不利情况, 近似按沿板桩壁的一维渗流来计算坑底土抗流砂、管涌的稳定性, 如图 2 所示。

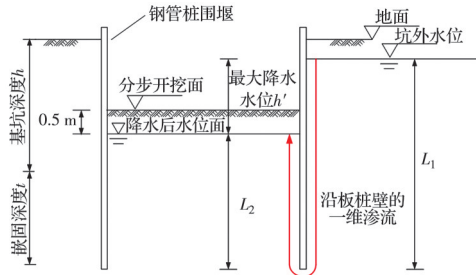


图2 最大降水深度  $h'$  的设计计算

Fig. 2 Design of maximum dewatering depth  $h'$

沿钢板桩壁的渗流渗透路径最短, 且忽略沿钢板桩壁底部的水平渗透路径, 渗透路径由式(12)计算。

$$L = L_1 + L_2 \quad (12)$$

式中:  $L$  为最短渗流路径流线总长度, m;  $L_1$  为坑外水位到钢板桩底面的距离, m;  $L_2$  为坑内水位到钢板桩底面的距离, m。

为保证坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性, 最大降水深度  $h'$  需要满足式(13)~式(15)。

$$\frac{i_{cr,f}}{i} \geq K_f \quad (13)$$

$$i = h'/L \quad (14)$$

$$i_{cr,f} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (15)$$

式中:  $K_f$  为抗流砂管涌稳定性安全系数, 规范中一般取 2.0;  $i$  为坑底土的渗流水力坡度;  $h'$  为最大降水高度;  $i_{cr,f}$  为坑底土的渗流水力坡度。  $G_s$  为坑底土的颗粒比重;  $e$  为坑底土体的天然孔隙比。

### 1.1.4 注水高度

达到最大降水开挖深度后, 若继续向下开挖, 必须向坑内注水并进行水下挖土, 则可以一次性水下挖土至坑底设计高程。注水后, 坑内水位面可由  $\Delta h$  确定, 如图 3 所示。注水高度  $H$  与  $\Delta h$  关系为

$$H = h - h_w - \Delta h \quad (16)$$

其中,  $\Delta h$  需要满足式(17)~式(19)。

$$\frac{i_{cr,f}}{i} \geq K_f \quad (17)$$

$$i = \Delta h/L \quad (18)$$

$$i_{cr,f} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (19)$$

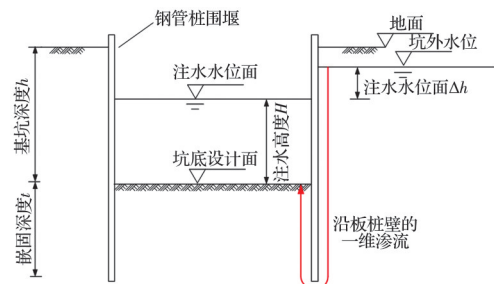


图3 注水高度  $H$  的设计计算

Fig. 3 Design of water injection height  $H$

## 1.2 基坑注水与水下开挖设计流程

基坑注水与水下开挖方法的施工流程分为插打钢板桩形成钢板桩围堰、降水形成旱地工作条件开挖、注水进行水下开挖、水下浇筑封底混凝土后再降水等 4 个步骤, 如图 4 所示。

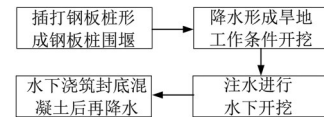


图4 基坑注水与水下开挖施工流程

Fig. 4 Construction process for deep foundation pit water injection and underwater excavation

根据基坑注水与水下开挖施工流程及其参数确定方法, 提出基坑注水与水下开挖的设计流程:

1) 根据式(6)、式(7)计算出钢板桩的嵌固深度  $t_1$  和  $t_2$ , 取其中的最大值作为钢板桩的嵌固深度  $t$ , 并根据基坑设计深度  $h$  确定钢板桩的总长度。

2) 根据式(14)计算坑内降水开挖时的最大降水深度  $h'$ , 并根据支撑道数确定分步开挖步数; 分步开挖时, 水位一般要降至开挖面以下 0.5 m, 以形成旱地工作条件, 并设置对应的内支撑。

3) 坑内降水达到最大降水深度  $h'$  后, 需向坑内注水至设计的注水水位(可由  $\Delta h$  确定)后, 进行水下一次性挖土至基坑底设计位置。

4) 水下浇筑封底混凝土, 待其达到设计强度后

再进行抽水,以形成旱地施工条件,进行明挖基础及桥墩的建造。

2 基坑注水与水下开挖实际工程案例

潜江汉江大桥主墩锁扣钢板桩围堰深基坑工程采用坑内注水与水下开挖施工方法,制定并实施了如下施工方案。

2.1 项目简介

潜江汉江大桥由主桥、跨堤桥和引桥组成,全

长 2 460 m,其中主桥为双塔单索面预应力混凝土部分斜拉桥。主桥 28#主墩钢板桩围堰深基坑长 28 m、宽 28 m,设计开挖深度为 15 m,采用钢板桩支护。基坑位于河岸,基坑地下水与江水或河水有稳定的水力联系,采用传统施工方法进行坑外降水与坑内排水难度极大。

依据工程勘察报告,主桥 28#主墩土层物理力学参数如表 1 所示。依据近 5 年水位变化统计,枯水期设计洪水位在 27 m 左右,因此本深基坑工程的施工水位取 27 m。

表 1 28#主墩土层物理力学参数  
Table 1 Ssoil parameters of 28# main pier

土层	底面标高/m	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)
粉砂	20.54	19.0	40	0.34	0	14
粉质黏土	11.74	19.0	45	0.33	30	12
粉细砂 1	5.84	19.0	45	0.30	0	17
粉细砂 2	-4.86	19.5	50	0.29	0	35
圆砾	-32.76	21.0	200	0.25	0	45
粉细砂 3	-61.36	20.0	55	0.26	0	44

2.2 施工设计方案

28#主墩承台锁扣钢板桩围堰顶标高 31.0 m,底标高 0.0 m。围堰内设置 3 道内支撑,内支撑标高分别为 28.0、25.0、23.0 m,基坑开挖深度为 15 m,钢板桩的嵌固深度为 14 m,封底混凝土厚为 2.5 m。设计的 28#主墩围堰及内支撑结构如图 5 所示。

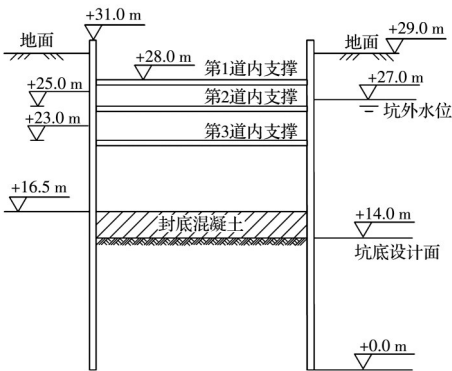


图 5 主墩围堰及内支撑设置

Fig. 5 Cofferdam and inner support set of main pier

针对实际工程地质水文情况,设计深基坑水下开挖施工方案,对 28#主墩承台水下基坑进行注水与水下开挖,具体施工方案如下:

1) 插打钢板桩

将 31 m 长的钢板桩打入土层,形成钢板桩围堰,钢板桩顶部距离地面 2 m。

2) 降水开挖

完成钢板桩插打后,将坑内水位降低至标高 26 m,再将基坑开挖至标高 27.0 m,并在标高 28.0 m 位置安装第 1 道围檩及内支撑。

将坑内水位降低至标高 23 m,再将基坑继续开挖至标高 24.0 m,并在标高 25.0 m 位置安装第 2 道围檩及内支撑。

将坑内水位降低至标高 21 m,基坑继续开挖至标高 22.0 m,并在标高 23.0 m 位置安装第 3 道围檩及内支撑。

3) 注水与水下开挖

向坑内注水,使坑内水面高程为 27.0 m,并将基坑一次性开挖至标高 14.0 m。

4) 水下浇筑混凝土后再降水

浇筑封底混凝土,待封底混凝土硬化后,抽空基坑内积水,然后开始 28#主墩承台施工。

基坑开挖流程如图 6 所示。

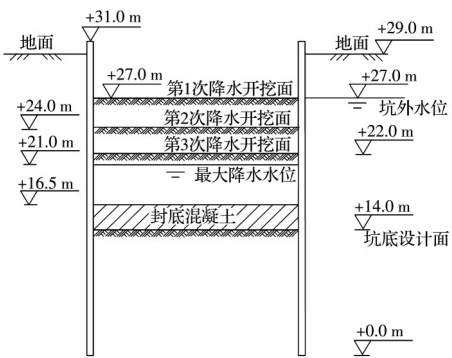


图 6 基坑开挖流程

Fig. 6 Foundation excavation process

2.3 稳定性计算

1) 嵌固深度计算

当基坑水下挖土至水下开挖面,尚未浇筑封底

混凝土时,需验算嵌固深度是否满足整体稳定性和基坑底部抗隆起稳定性。

#### a) 整体稳定性验算

采用等值梁法验算基坑开挖 15 m 时钢板桩的稳定性,可得  $u=0$ 、 $t_0=11.65$  m、 $t_2=13.98$  m,本方案钢板桩嵌入深度  $t=14$  m,满足要求。

#### b) 基坑底部抗隆起稳定性验算

锁扣钢板桩底部土层的黏聚力为 0,内摩擦角为  $35^\circ$ ,  $\gamma_0=10$  kN/m<sup>2</sup>,  $\gamma_1=19$  kN/m<sup>2</sup>,  $\gamma_2=9$  kN/m<sup>2</sup>,  $\gamma_3'=9.5$  kN/m<sup>2</sup>,  $t_1=14$  m, 计算得到承载力系数  $N_q=33.2$ 、 $N_c=46.0$ 。由此可得其底部抗隆起稳定性系数

$$\frac{\gamma_3' t_1 N_q + \gamma_0 (h - h_w - \Delta h) N_q + c N_c}{\gamma_1 h_w + \gamma_2 (h + t_1 - h_w) + q} = 14.16 > 1.8$$

由此可知,锁扣钢板桩底部抗隆起安全系数满足要求。

#### 2) 最大降水深度 $h'$ 与注水高度的验算

施工过程中最大降水深度  $h'=6$  m,取土体  $G_s$  为 1.9,  $e$  为 0.6,可得到降水至标高 21 m 时的坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性系数。

$$i_{cr,t} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = 0.5625$$

$$i = h'/L = 0.125$$

$$\frac{i_{cr,t}}{i} = \frac{0.5625}{0.125} = 4.5 > 2$$

由此可知,降水深度满足坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性要求。由于注水高度为 13 m,坑内水位与坑外水位相平,不存在水头差,因此,坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性也符合要求。

#### 3) 封底混凝土厚度的验算

围堰长 28 m,宽 28 m,封底混凝土厚度为 2.5 m,依据上述公式,验算封底混凝土的抗浮安全系数。

$$G = \gamma_4 x s_1 = 24 \times 2.5 \times 28 \times 28 = 47\,040 \text{ kN}$$

$$F = \gamma_0 g h s_1 = 10 \times 15 \times 28 \times 28 = 117\,600 \text{ kN}$$

$$f = \mu x C = 380 \times 2.5 \times 28 \times 4 = 106\,400 \text{ kN}$$

$$k = \frac{G + f}{F} = 1.3 > 1.1$$

可见,混凝土的厚度满足抗浮稳定性要求。

### 3 钢板桩内力与变形及注水高度优化

依托潜江汉江大桥主墩锁扣钢板桩围堰深基础工程,利用数值模拟方法研究基坑注水与水下开挖方法中支护结构的水平位移、弯矩和坑底隆起的变形规律,并对注水高度进行优化。

#### 3.1 数值模型与本构关系

##### 1) 数值模型

钢板桩围堰长 28 m、宽 28 m,设计开挖深度为

15 m。结合已有工程经验,基坑开挖对周围土体的影响深度约为基坑深度的 2~4 倍,影响宽度约为基坑深度的 3~4 倍。在数值模型中,土体宽度取 250 m,深度取 60 m。数值模拟模型如图 7 所示。

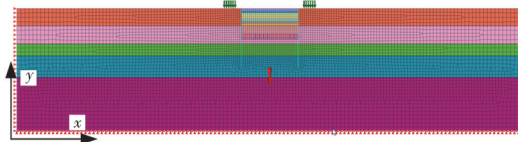


图7 数值模拟模型

Fig. 7 Numerical simulation model

##### 2) 本构关系

土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,模型参数如表 1 所示,支护结构采用弹性本构模型,结构材料参数如表 2 所示,在支护结构与两侧土体间设置线界面单元,使结构与土体间可以传递应力和变形。线界面单元用摩尔摩擦非线性界面模型,依据经验和类似工程参数,取法向刚度模量  $K_n=7\,177.5$  MPa,切向刚度  $K_t=652.5$  MPa;依据表 1 中土层的物理力学参数,选取各土层的厚度、黏聚力、摩擦角参数。

表2 支护结构材料参数

Table 2 Material parameters of support structure

结构	重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$	截面 尺寸 /m
围护桩	78.5	206 000	0.3	$D=1.02$
内支撑	78.5	206 000	0.3	$D=0.82$
封底混凝土	24.0	28 000	0.2	$x=2.5$

##### 3) 荷载与边界条件

在降水开挖阶段,将基坑内水位设置在开挖面 1 m 以下,在水下开挖阶段,考虑坑内水会对支护结构侧壁产生水压力,除设置坑底水头之外,还需将坑内水对支护结构的作用等效为三角形荷载,施加在支护结构上。基坑左右两侧边界条件为水平向约束  $u_x=0$ ,底部边界条件为水平向约束  $u_x=0$ 、竖向约束  $u_y=0$ 。施工时起重机引起的地面超载为 40 kPa。

##### 4) 封底混凝土的处理

封底混凝土的浇筑可以通过替换土体网格参数来实现。

##### 5) 工况与分析步

先给模型施加初始渗流场,然后平衡地应力,激活支护桩和地面超载,最后进行基坑注水与水下开挖的数值计算。数值计算包括 3 种工况及 5 个开挖步:坑内降水与开挖、坑内注水与水下开挖、浇筑封底混凝土并抽水,如表 3 所示。其中,  $D$  为围护桩或内支撑的直径;  $x$  为封底混凝土厚度。

表 3 分步开挖与支护工况  
Table 3 The conditions of step-by-step excavation and support

工况	阶段名称	具体操作
降水开挖	①降水开挖 2 m	激活第 1 次降水水头,钝化第 1 层开挖土体,激活第 1 道撑
	②降水开挖 5 m	激活第 2 次降水水头,钝化第 2 层开挖土体,激活第 2 道撑
	③降水开挖 7 m	激活第 3 次降水水头,钝化第 3 层开挖土体,激活第 3 道撑
注水与水下开挖	④注水与水下开挖	激活坑内水头,钝化坑底设计面以上所有土体
水下浇筑混凝土后再降水	⑤浇筑混凝土与抽水	激活封底混凝土,钝化坑内水头

3.2 支护结构的内力与变形及坑底隆起

3.2.1 降水开挖

基坑进行了 3 次降水开挖,分别开挖至 2、5、7 m。在这一过程中,支护桩结构的变形和坑底隆起如图 8~图 10 所示。可见,在降水开挖阶段,随着基坑开挖深度的增加,支护桩向坑内的水平变形逐渐增大,当开挖至 7 m 时,桩顶水平位移达到 10.3 mm,小于规范要求的 40 mm。

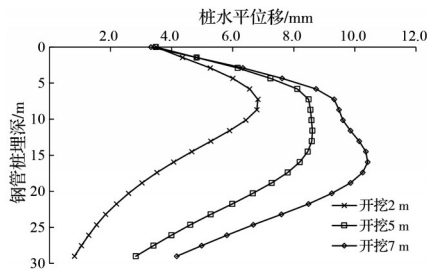


图 8 支护桩水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of the supporting pile

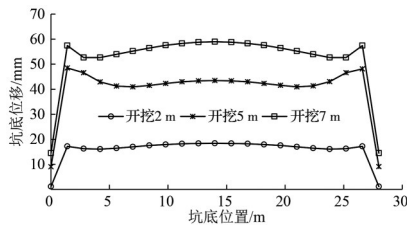


图 9 坑底隆起变形

Fig. 9 Uplift deformation of pit bottom

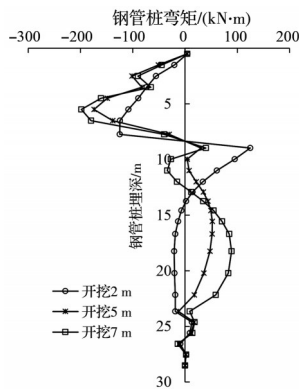


图 10 支护桩弯矩

Fig. 10 Bending moment of the supporting pile

随着开挖深度的增加,在 8.5~17.26 m 段钢板桩的弯矩方向发生了改变,这是由于该段支护桩处

于黏土层,随着开挖深度的增加,基坑内上部土体被挖出,支护桩所受的内部土压力逐渐小于外侧土压力,从而改变了弯矩的方向。

在降水开挖阶段,坑底出现塑性隆起,隆起量两边大、中间小,随着开挖深度的增加,隆起量逐渐增大,最大为 59.0 mm,小于规范要求的较大值 60 mm (周边没有建筑物)。可以看出,若继续降水开挖,基底地基土隆起变形将超过规范要求,开挖至该深度时需停止降水开挖,向基坑内注水后再开挖。

3.2.2 注水与水下开挖

在开挖 7 m 后基坑停止降水,向基坑内注水至标高为 27 m 后,水下挖土至设计标高 14 m 位置。在这一过程中,支护桩结构的变形和坑底隆起如图 11~图 13 所示。

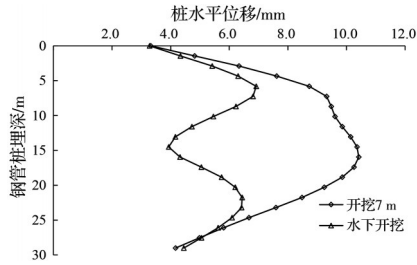


图 11 支护桩水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of the supporting pile

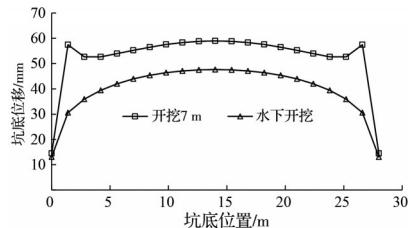


图 12 坑底隆起变形

Fig. 12 Uplift deformation of pit bottom

水下开挖完成后,水下开挖支护桩的水平位移随埋深的变化曲线整体趋势与降水开挖完成后(开挖 7 m 时)一致,但两者在数值上有明显区别,采用水下开挖时支护桩的水平位移明显降低,其最大值为 6.9 mm,而采用降水开挖时支护桩的水平位移最大值为 10.4 mm,比前者约大 50.7%,水下开挖和降水开挖 7 m 工况下支护桩最大弯矩出现的位置相同,都在埋深 6 m 即第 3 道内支撑处,前者弯矩最



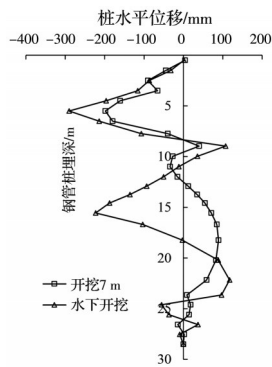


图13 支护桩弯矩

Fig. 13 Bending moment of supporting pile

大值为 198.18 kN·m,后者弯矩最大值为 290.26 kN·m。

水下开挖阶段的坑底隆起曲线与降水开挖阶段存在明显不同,坑底出现弹性隆起,其隆起量中间大、两边小,最大为 47.7 mm,比前者降低约 19.2%,小于规范要求的较大值 60 mm。由此可知,采用水下开挖方法可以减小支护桩的变形,明显减小坑底隆起变形,对保证围护结构的安全有利。

### 3.2.3 水下浇筑混凝土后再降水

封底混凝土浇筑完毕后抽干基坑内的水,得到水下开挖施工完毕的位移云图,如图 14、图 15 所示。

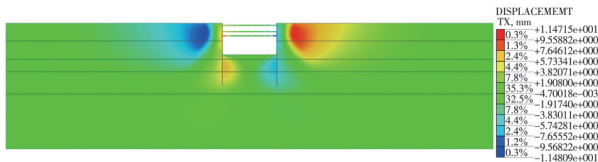


图14 基坑水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of foundation pit

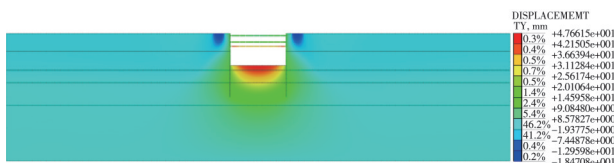


图15 基坑竖向位移

Fig. 15 Vertical displacement of foundation pit

基坑开挖后,基坑外侧承受超载处土体的水平位移如图 14 中红色与蓝色部分所示,其值分别为 11.5、-11.5 mm,大小相同,方向均朝向坑内。基坑外侧承受超载处土体发生沉降,沉降量为 18 mm,如图 15 中蓝色部分。基坑坑底出现了弹性隆起,坑底中部隆起最高,最大隆起量为 47.7 mm,小于规范要求的 60 mm,如图 15 中的红色部分,呈中部大、两侧小的对称特征。从模拟结果来看,基坑的变形基本符合基坑开挖后的变形特征<sup>[17]</sup>。

### 3.3 坑内注水高度的优化

坑内注水高度是水下开挖方法的关键性技术

指标。本工程基坑注水水位与坑外水位相同,即注水高度  $H=13$  m。虽然保证了施工安全,但注水高度增加会加大水下施工难度,因此有必要对坑内注水高度进行优化,分别取注水高度  $H$  为 7、9、11、13 m 四种情况进行研究,对应的  $\Delta h$  分别为 6、4、2、0 m。

不同注水高度下支护桩的水平位移曲线如图 16 所示,注水高度  $H$  由 7 m 变为 13 m 的过程中,支护桩的水平位移逐渐减小; $H$  为 7、9、11、13 m 时,支护桩最大水平位移分别为 19.3、12.1、8.9、6.9 mm,表明注水高度的升高对支护桩水平位移的限制作用较为明显。本工程中,注水高度  $H$  高于 9 m 时,继续增加注水高度对于支护桩的水平位移和桩身弯矩的减小作用逐渐减弱,表明注水高度存在一个临界值,超过这一临界值后,其作用效果会减弱,本工程可取  $H=9$  m(对应的  $\Delta h$  为 4 m)。

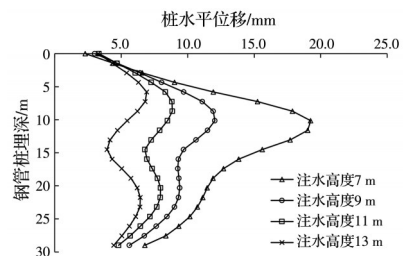


图16 不同注水高度下支护桩水平位移

Fig. 16 Horizontal displacement of supporting piles with different water injection heights

## 4 结论

1)降水水上开挖时,最大降水深度取决于坑底地基土抗流砂、管涌的稳定性;基坑分步开挖深度从 2 m 增加至 7 m 时,支护结构水平位移增加了 53.6%,坑底塑性隆起量的最大值逐渐增大至 59.0 mm,坑底隆起量两边大、中间小。

2)注水与水下开挖时,增加注水高度能有效减少支护桩的水平位移;存在一个临界注水高度,当注水高度超过该临界值后,其抑制支护桩变形的效果会减弱,对于本研究中的深基坑工程,该临界值为 9 m(对应的坑外水位与注水水位的水头差  $\Delta h$  为 4 m)。

3)相比降水水上开挖,注水与水下开挖的支护结构最大水平位移约减小了 33.7%,坑底最大隆起约降低了 19.2%,表明注水与水下开挖能有效减小支护结构的水平变形,有利于支护结构的稳定性。

4)封底混凝土的厚度取决于封底混凝土的抗浮稳定性和强度。这是由于封底混凝土底面的浮力主要由封底混凝土的自重和封底混凝土与支护结构的粘结力来平衡,增加封底混凝土的厚度不仅



能增大封底混凝土的自重,还能增大封底混凝土与支护结构的粘结强度。

5)在中国首次采用该方法进行施工,工程时间紧迫,受汉江洪水位影响较大,未对支护结构的受力与变形等进行监测。但该工程成功实施的经验对类似工程具有参考价值,今后可通过现场足尺试验对其进行验证。

## 参考文献

- [1] SHI C H, CAO C Y, LEI M F. Construction technology for a shallow-buried underwater interchange tunnel with a large span [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 70: 317-329.
- [2] 胡云华. 临江高承压水超深基坑开挖抗突涌分析与对策: 以南京纬三路长江隧道梅子洲风井基坑为例[J]. *隧道建设*, 2015, 35(11): 1194-1201.  
HU Y H. Analysis on and countermeasures for water inrush in construction of ultra-deep foundation pit at river-side under high confined water: Case study on deep foundation pit of meizizhou ventilation shaft of weisanlu river-crossing tunnel in Nanjing [J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(11): 1194-1201. (in Chinese)
- [3] 杨建民, 郑刚. 基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 261-264.  
YANG J M, ZHENG G. Classification of seepage failures and opinion to formula for check bursting instability in dewatering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 261-264. (in Chinese)
- [4] LI B, JIA C Q, WANG G H, et al. Numerical analysis on the performance of the underwater excavation [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-14.
- [5] GOH A T C, ZHANG R H, WANG W, et al. Numerical study of the effects of groundwater drawdown on ground settlement for excavation in residual soils [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(5): 1259-1272.
- [6] ZHANG W G, WANG W, ZHOU D, et al. Influence of groundwater drawdown on excavation responses: A case history in Bukit Timah granitic residual soils [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(5): 856-864.
- [7] LUO S. Research and application of anti-floating schemes of deep foundation pit of subway for underwater excavation and underwater concrete sealing [J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 165: 04001.
- [8] CAO C Y, SHI C H, LIU L H, et al. Novel excavation and construction method for a deep shaft excavation in ultrathick aquifers [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1-15.
- [9] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 汪新立. 桥梁基础钢板桩围堰设计与施工[J]. *铁道建筑技术*, 2012(3): 69-73.  
WANG X L. Design and construction of steel sheet pile cofferdam of bridge foundation [J]. *Railway Construction Technology*, 2012(3): 69-73. (in Chinese)
- [11] 董广文. 南京大胜关长江大桥主桥8号墩钢吊箱围堰封底施工[J]. *桥梁建设*, 2009, 39(1): 1-3, 6.  
DONG G W. Construction of steel boxed cofferdam bottom sealing for pier No. 8 of main bridge of Dashengguan Changjiang River bridge in Nanjing [J]. *Bridge Construction*, 2009, 39(1): 1-3, 6. (in Chinese)
- [12] 崔清强. 围堰封底混凝土与钢管桩粘结力模型试验研究[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(6): 69-74.  
CUI Q Q. Model test study of bonding forces between cofferdam base sealing concrete and steel pipe piles [J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(6): 69-74. (in Chinese)
- [13] YANG M L, XIA G Y, ZHONG F P. Finite element analysis and simplified model of searing bottom concrete for steel cofferdam [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 255-260: 1873-1878.
- [14] CHEN S, LI Y H, GUO P P, et al. Ultimate bearing capacity of bottom sealing concrete in underwater deep foundation pit: Theoretical calculation and numerical analysis [J]. *Machines*, 2022, 10(10): 830.
- [15] 李博. 水下开挖地铁深基坑变形特性及支护结构工作性状研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.  
LI B. Study on deformation characteristics and working behavior of supporting structure of subway deep foundation pit excavated underwater [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese)
- [16] 钢围堰工程技术标准: GB/T 51295—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.  
Technical standard of steel cofferdam engineering: GB/T 51295—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [17] 马险峰, 刘畅, 徐良义. 修正双屈服面模型在软土基坑开挖中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊2): 3883-3893.  
MA X F, LIU C, XU L Y. Application of modified double-yield surface model in foundation excavation of soft soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 2): 3883-3893. (in Chinese)