

地下连续墙和深基础工程的发展概况与应用

丛蔼森

(北京市京水建设集团有限公司, 北京 100193)

摘要: 本文叙述非圆形地下连续墙和深基础工程发展概况、设计要点和工程实例。文中列举了在城市建设、桥梁、地铁以及大型桥梁锚碇基础工程中采用条桩、十字桩、墙桩和井筒式地连墙基础的工程实例。指出应深入研究地下连续墙的原理和计算方法, 优化设计和施工方案, 使其得到更广泛的应用。

关键词: 地下连续; 非圆桩; 深基础; 工程实例

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)01-0001-12

Development situation and application of diaphragm wall and deep foundation engineering

CONG Ai-sen

(Beijing Jingshui Construction Group Co., Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: The development situation, design points and engineering examples of non-circular diaphragm wall and deep foundation were described in this paper. Examples of using panel pile, cross pile, wall pile and shaft foundation in urban construction, bridge, subway and large bridge anchorage foundation are presented in this paper. It is proposed that the principle and calculation method of the diaphragm wall should be studied deeply, and the design and construction plan should be optimized so that it can be widely used.

Key words: diaphragm wall; non-circular pile; deep foundation; engineering example

1 前言

1.1 发展概况

随着现代化高大建(构)筑物的不断涌现, 基础工程的重要性日益受到人们的重视。基础工程的概念和技术领域已经发生了很大变化。基础工程作为地下结构物存在于地下, 它是由地基和上部工程结构以及钻孔机械和工艺、混凝土技术等组成的综合技术, 是包括从勘察、规划到设计、技术装备、施工工法和监测控制多方面的技术体系。

自从 1950 年在意大利圣·玛利亚水库坝基首次采用地下连续墙以来, 经过二十多年的推广和发展, 到了 70 年代已经成为重要的基础工程施工技术, 很快推广到世界各地。地下连续墙技术(特别是深基础和深基坑)在日本得到了快速的发展, 从设计理论到造孔机械和施工工法方面, 都达到了世

界先进行列; 他们首先提出了地下连续墙深基础这个新概念, 并且首先付诸实施。1979 年在日本的东北新干线高架桥工程中采用的地连墙井筒式基础, 代替了惯用的沉井式基础, 可以说是开了地连墙深基础工程的先河。在此以后的 20 年中, 地下连续墙深基础由于大型液压抓斗、旋挖钻机和双轴水平铣槽机(双轮铣)的研制成功获得了更为迅速的发展。据统计, 到 2006 年 6 月底, 日本已在 390 项工程中使用地连墙深基础。目前不仅可以用地下连续墙代替桩基, 而且可以用来代替沉井, 做成刚性深基础。

地连墙深基础的断面可以是闭合的多边形或圆环形结构, 也可以是条状、片状或其他非闭合断面形式。从它的刚度来看, 有时像直接基础或沉箱基础那样的刚性体, 有时则是弹性体。

这里要指出的是, 地连墙基础的刚度不仅取决

收稿日期: 2020-07-31

作者简介: 丛蔼森(1941—), 男, 教授级高级工程师, 国务院特殊津贴专家, 岩石力学与工程学会原理事, 锚固与注浆分会副理事长, 北京南水北调工程顾问, 北京市建委危险性较大工程专家。E-mail: congais@163.com。

于基础几何尺寸和材料特性（即 EI 值），而且取决于各单元墙段之间的接头型式，也就是说，只有采用刚性接头并且能传递全部水平剪力时，才可能是刚性基础；否则的话，就不是绝对的刚性基础。这一点是地连墙基础所独有的。

从结构的断面型式来看，可把地连墙深基础划分为墙（条）桩（见图 1 和图 2）和井筒式深基础（见图 3）两大类。其中墙桩中断面尺寸较小的桩又叫做条桩（片桩）。井筒式深基础又可划分为圆环形、多边形或单室、多室形。

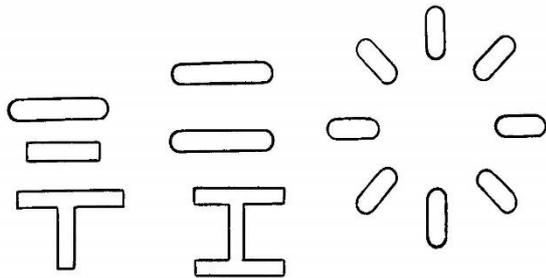


图 1 条桩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of panel pile

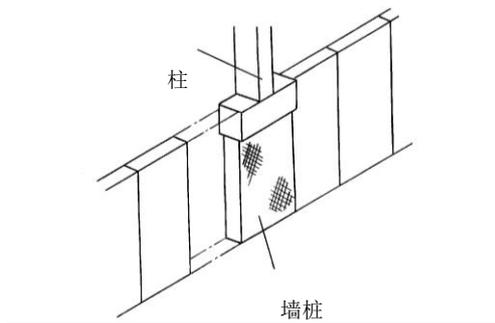


图 2 墙桩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wall pile

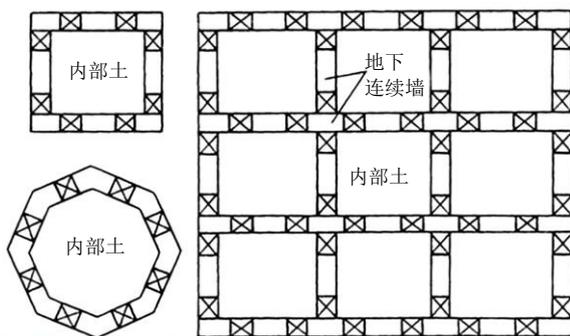


图 3 井筒式基础

Fig. 3 Shaft foundation

1.2 深基础和深基坑工程的最新发展概况

目前钢筋混凝土（RC）地下连续墙施工深度见表 1；基坑内部开挖深度见表 2。

地下连续墙的厚度，实际挖槽厚度已达 2.8 m，见表 3。表 3 中列第 3 位的变电站深基坑挡土墙，

采用变断面的地下连续墙，其上部深 44 m、墙厚 2.4 m；下部深 26 m、厚 1.2 m。

深基坑多采用圆形平面，可以充分利用混凝土抗压的特点，减少内部支撑结构，见表 4。

日本混凝土设计标准强度等级为 60；取芯实测 85 MPa。据 2015 年 8 月日文“基础工”介绍，目前日本现场浇注某些桩基混凝土的设计强度为 100 MPa。国内 2019 年深基坑工程中混凝土强度等级有 45/55。

地下连续墙已应用于很多基础工程中，见表 5。

表 1 地下连续墙施工深度
Table 1 Depths of diaphragm wall

排位	墙深/m	用途地点	施工日期
1	140	排水竖井 3 号	1993 年
2	130	排水竖井 1 号	1994 年
3	129	排水竖井 2 号	1993 年
4	122	排水竖井 4 号	1995 年
5	119	川崎人工岛	1991 年
试验	250	意大利	2012 年
试验	150	明石大桥	1987 年
试验	150	上海	2015 年
国内	76.6	穿黄隧洞	2009 年
国内	77.3	滇中引水	2019 年

表 2 基坑开挖深度
Table 2 Excavation depths of foundation pit

排位	开挖深度			施工日期
	开挖深度 h_p /m	地连墙深/m	用途地点	
1	110.1	110.1	管道竖井	2004~2005 年
2	82.0	110	污水井	1995 年
3	76.0	106	白鸟大桥墩	1988 年
4	75.0	119	川崎人工岛	1991 年
5	74.7	83	管道竖井	1993 年
国内	50.1	76.6	穿黄隧洞	2009 年
国内	77.3	99.6	滇中引水	2019 年

表 3 地下连续墙厚度
Table 3 Thicknesses of diaphragm wall

排位	墙厚/m	用途地点	施工日期
1	2.8	川崎人工岛	1991 年
2	2.6	污水竖井	1988 年
3	2.4	变电站深基坑	1993 年
4	2.4	桥梁深基坑	1998 年
5	2.4	大楼深基坑	1999 年
国内	1.5	悬索桥锚碇	2003 年

表 4 圆形深基坑平面设计尺寸

Table 4 Plane design dimensions of round deep foundation pit

排位	内径/m	用途地点	施工日期
1	144	变电站深基坑	1993 年
2	140	高雄地铁	2002—2003 年
3	98	川崎人工岛	1991 年
4	81	抽水井	1992 年
5	80.5	地下贮槽	1996 年
国内	82	悬索桥锚碇	2005 年

表 5 地下连续墙基础

Table 5 Diaphragm wall foundations

排位	深度/m	用途地点	施工日期
1	106	白鸟大桥 3 号墩	1988 年
2	77	隧道竖井	1990 年
3	76	明石大桥锚碇	1994 年
4	76	大楼深基础	1994 年
5	75	高速路	1989 年
国内	77.6	穿黄隧洞	2009 年

我国水利工程中防渗墙也采用地下连续墙技术,如长江三峡二期围堰工程,在 60 m 深水中修建土石围堰,最大高度 82.5 m;防渗墙长 1439.5 m,局部双排,最深 73.5 m。大河沿水电站土坝防渗墙最深达 186 m,墙厚 1.2 m,是迄今为止世界上最深的防渗墙。

西藏旁多水电站土坝防渗墙挖槽试验深度曾达到 201.47 m。四川冶勒水电站采用双层防渗墙,上段防渗墙 71 m×1.2 m,下段防渗墙 76 m×1.0 m。

新疆下板地水电站土石坝最大坝高 78 m,河道覆盖层深度 150 m,土石坝沥青混凝土心墙厚度 0.6~1.2 m,混凝土防渗墙最大深度 85 m,厚度 1.0 m,防渗墙面积 18 000 m²。

地下连续墙作为防渗墙取得了很大成功。

2 井筒式地连墙基础

2.1 概述

井筒式地连墙基础是一种闭合断面的地下连续墙深基础。它利用构造接头把地连墙的墙段连结成一个外形为矩形、多边形或圆环形且其内部可分为一个或多个空格(室)的整体结构,并在其顶部设置封口顶板,以便与上部结构连接。

沉井结构也是中空的深基础结构,但是由于施工速度和安全方面的原因,目前应用越来越少了。从 1966 年到 1986 年的 20 年内,沉井在日本基础工程中占有的比例已由 26.1% 迅速下降到只有

4.0%,到了本世纪初期已经不到 1%了;而地连墙深基础的应用在 1976—1986 年的 10 年内几乎增加了 1 倍。

地连墙基础与沉井相比,其优点主要体现在:

(1) 地连墙基础能与地基牢固地连接在一起,基础的侧面摩阻力大。

(2) 可以建成刚性很大的基础结构。

(3) 几乎可以在任何地基中施工;也可以在水面施工平台上施工。

(4) 可以建成任意载面、任意刚度的桩基和深基础,其最大深度已可达到 150 m。

(5) 在地表面上进行机械化施工,安全度比沉井法高出很多;施工噪音和振动均很小。

(6) 可以实施接(贴)近已有建(构)筑物施工。

从总体上来说,井筒式基础的技术经济效益是显著的。

2.2 设计计算

井筒式地连墙基础的设计计算中,通常先将地基模拟为弹塑性材料,通过计算求出基础变形、正面及侧面的地基反力以及基础本身垂直方向的内力;然后利用计算的地基反力和断面内力进行垂直构件和水平构件的相关设计。

(1) 有效墙厚和设计墙厚

在进行稳定计算时应使用设计墙厚;在计算钢筋混凝土截面时应使用有效墙厚:

$$\text{有效厚度 (cm)} = \text{设计墙厚} - 4.0$$

有人建议有效厚度等于设计墙厚,而将主钢筋的保护层厚度适当加大一些。

(2) 垂直方向构件的计算

通常将作用于井筒下端(基础底面)的竖向力作为地连墙基础应力计算用的轴向力,采用上述计算模型算出的断面内力,利用有效墙厚来进行配筋设计。

(3) 水平向构件的计算

根据算出的横向地基反力以及基础稳定计算得出的基础底面剪切地基反力,进行有关横向构件的计算和设计。

一般取计算深度的最大地基反力为设计荷载;因地基分成几层而导致水平向地基反力变化较大时,可以利用等效地基反力进行计算。

3 墙桩(条桩)

3.1 概述

各种开式断面的地连墙基础,也就是所谓的墙

桩或条桩以及丁字桩、十字桩、工字桩等。它们大多属于弹性桩范畴。为了叙述方便,常将所有开式断面的地连墙基础叫做地连墙桩或条桩。

3.2 墙桩的设计要点

对于承受竖向荷载的墙桩来说,可以采用以下方法进行计算和设计:

(1) 静力计算法

根据桩侧阻力和桩端阻力的试验或经验数据,按照静力学原理,采用适当的土体强度参数,分别对桩侧阻力和桩端阻力进行计算,最后求得桩的承载力。

(2) 原位试验法

原位进行静载试验来确定桩的承载力,是目前最常用和最可靠的方法。还有一种采用自平衡测桩法来确定桩的承载力;原位进行动力测试也可确定桩的承载力,但目前还不能完全代替静载试验法。

对于承受水平荷载的单桩,其承载力的计算方法有地基反力系数法、弹性理论法、极限平衡法和有限元法以及现场试验法等。地基反力系数法是我国目前最常用的计算方法。

桩的变形(沉降、水平位移和挠曲)可参照有关规范进行计算。

日本在计算地连墙桩时,完全采用有限元法,把墙桩看作是弹性地基上的无限或有限长梁,把墙桩看成是由桩基、结构和周围弹性体(地基)3部分组成的组合体,进行内力计算。

3.3 大断面墙桩的工程实例

图4是日本某桥梁基础工程采用的墙桩。该桥的P12~P18排桥墩左右(L,R)两个基础都采用了地连墙桩方案。根据所在部位的地形和地质条件,每个桥墩下面一般采用2根墙桩,个别部位采用3根墙桩。墙桩宽均为10m,厚1.0~1.2m,深30.0~51.0m。桩底深入泥岩中。

此桥基础采用2排或3排平行的墙桩;墙桩沿桥长轴方向刚度较小,弹性较大,可以适应上部多跨连续梁桥的温度荷载。而在垂直于桥轴方向上,墙桩刚度很大,用来承受该方向地震荷载。这种不同方向刚度不同的特点,正是地连墙桩所独有的。正是由于这个原因,此工程没有采用常用的矩形或多边形闭合地连墙的井筒式基础。

基础的计算模型是沿桥轴方向为一个弹性门型框架,而在垂直于桥轴的方向则为一个刚性基础墙桩。此种布桩方式值得借鉴。

3.4 条桩的设计

条桩也是地连墙桩基础的一种,它的几何尺寸

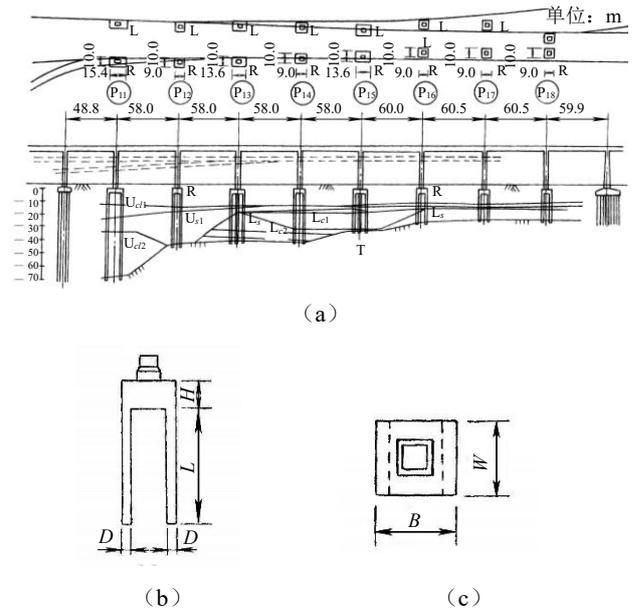


图4 大断面墙桩基础图

Fig. 4 Large section wall pile foundation

较小,刚度也比较小,常作为单桩基础或群桩基础;所以仍可采用目前的桩基技术规范来进行设计。由于施工机具和方法的不同,条桩的断面尺寸和深度也各有不同;其端部为半圆弧形或矩形。现在这种条桩的应用范围和实施的工程数量越来越多了。

众所周知截面面积一定的情况下,圆的周长最小,正方形较大,长方形更大。在桩基工程中,在使用同样数量的混凝土条件下,非圆形的长方形桩能获得更大的侧面积以及侧面摩阻力,提高了摩擦桩的承载力。如果用长条形桩(条桩)代替圆桩,而保持承载力不变的话,则可节约10%~15%的混凝土,提高施工效率6~10倍(北京市东三环)。此外矩形断面的抗弯刚度比圆形断面大,而且在它的两个互相垂直的方向上,具有不同的抗弯刚度。可以充分利用这一特性,合理布置条桩的位置和方向,比如把条桩的长边沿着主要地震或风荷载方向布置,既可保证工程安全,又可节省混凝土,降低工程造价。

条桩可以作为建筑(构)物的桩基、群桩基础或者作为基坑的支护挡土墙。

4 我国的应用实例

4.1 概述

下面简要介绍一下我国地下连续墙基础技术的应用以及发展情况。从20世纪90年代初期以来,已经在下列工程和部门中应用了地下连续墙基础:

(1) 高层建筑的深基础工程(墙桩和条桩、群

桩)。

(2) 桥梁承台下的条桩基础(代替圆桩)。

(3) 地铁车站柱基下的桩基础(条桩和十字桩)。

(4) 大型桥梁(如悬索桥和斜拉桥等)的井筒式基础(锚碇)。

(5) 各种穿越江河、道路、铁路等隧道的进出口竖井。

(6) 其它工程。

下面结合几个笔者设计施工或参与咨询的、有代表性的地连墙基础工程加以说明。

4.2 高层建筑的墙桩和条桩

(1) 概况

随着地下连续墙施工技术的不断发展和提高,原来用于基坑支护的地下连续墙,不再仅仅用来承受施工荷载和防渗,而且还被用来承受永久(垂直)荷载,这样就变成集承重、挡土和防渗于一身的所谓三合一地下连续墙。

这种三合一地下连续墙基础具有如下特点:

a) 可以充分利用红线以内地面和空间,充分发挥投资效益。

b) 可减少基坑内支撑的数量和截面尺寸,便于采用逆作法施工。

c) 地连墙防渗止水效果好,基坑降水费用可大大降低。

d) 基坑周边地连墙可承受很大的垂直荷载,可减少工程桩的数量。

e) 节省基础底板的外挑部分的混凝土和相应的外排桩基工程量;可以减少底板厚度。

f) 地下连续墙施工单元较大,一般 6 m 左右,它的造孔、清孔和浇注混凝土各道工序都是可以检查的,质量可靠度高。

g) 把临时围护用的地连墙(或排桩)用于永久承载用,可节省基坑工程费用;而且工效高,工期短,质量有保证。

对于开挖深度 15~20 m 以上的基坑来说,地下连续墙应是首选的基坑支护方案。

笔者从 1992 年开始采用三合一地连墙技术解决了北京王府饭店东侧的新兴大厦基坑支护问题;1993 年用条形桩代替圆桩建成了北京东三环路上的双井立交桥;同时在天津冶金科贸大厦基坑中采用了三合一地下连续墙深基础,把 28 层大厦的荷载直接作用在地下连续墙(墙桩)和条桩上面,这在国内尚属首次。目前总共完成这种地连墙(桩)

已经超过 40 万 m^2 。

(2) 天津冶金科贸大厦(招商银行)的地连墙桩和条形桩基

a) 概况

天津市冶金科贸大厦位于天津市友谊路北段路东,由主楼、副楼和配楼 3 部分组成。主楼地上 28 层,地下 3 层。本工程地表以下 1.6~4.0 m,为人工杂填土层,主要由炉灰渣、砖块、石子等组成。其下为粉土、黏土和粉细砂。地下水位于地面以下 0.8~1.2 m。笔者提出了改进的基础工程总体方案,主持了地连墙及桩基的施工图设计和施工工作。

1) 原设计方案

主、副楼基坑长 70.2 m,宽 31.2 m,深 12.0 m。基础底板厚 2.2 m,为减少地基附加压力和不均匀沉降,将基础底板外挑 2.5 m。

原设计工程桩: $\Phi 0.8$ m 灌注桩,共 330 根。其中主楼 225 根(外挑段 43 根),桩长 36 m(有效桩长 24 m),间距 2.2 m,设计单桩承载力 220 t/根。

2) 基坑支护和桩基方案的优化

由于基坑周围有多座楼房和电力、电讯管线,对基础沉降和水平变形很敏感,打桩会影响周围居民的正常生活;本工程施工场地很小,特别是主楼施工期间,不可能同时安排几台普通打桩机进场施工。经技术经济比较并报经天津市建委批准,最后采用三合一地连墙桩和条形桩基方案(见图 5),2 种桩的比较见表 6。

由于条桩断面尺寸和刚度很大,单桩的抗冲切、抗刺穿能力强;底板的厚度由原来的 2.2 m 变为 1.6 m;还取消了原底板周边外伸 2.5 m 的混凝土和灌注桩 43 根。

本工程共完成地连墙 244 m,43 个槽段、墙深 18~37 m,墙厚 0.8 m;条桩 54 根,深 27~37 m,断面 2.5 m \times 0.6 m;地连墙锚桩 2 根,深 47.0 m;总的挖槽面积 14 067 m^2 。

3) 静载试桩

估算 2.5 m \times 0.6 m 的条桩承载力约为 750~850 t。为了验证地连墙桩基基承载力和沉降量,按要求进行了 2 根静压桩试验。

为不与基坑开挖相干扰,试桩在基坑外进行(见图 6);并利用试桩作为塔吊基础桩。远端锚桩则是 2 根深 47 m、2.5 m \times 0.6 m 的条桩。由建科院地基所承担静压桩试验。经分析确定 2 根桩的极限承载力分别为 1 600 t 和 1 800 t(见图 7);允许承载力分别为 1 050 t 和 1 300 t;即 1 根条桩相当 5~

6根Φ0.8 m的圆桩。则54根条桩总承载力将达到54 600 t, 大大超过设计荷重(49 500 t)。另外, 周长为125 m地连墙墙桩还可提供约19 000 t的承载力。

根据静压桩试验结果, 可以求得桩身单位侧摩阻力6.6 t/m²(原采用4 t/m²), 桩端承载力可达140~160 t/m²(原80~100 t/m²), 均比原设计值高出50%。

本工程基坑支护和桩基工程经过优化和改进后, 在保证工程质量的前提下, 快速、安全、文明

施工, 大大缩短了工期, 降低了工程造价, 减少了环境污染。共节约混凝土约2 000 m³, 降低工程投资200多万元。

4) 工程效果

经对主楼基坑开挖后观察和检测, 证明地连墙已经达到了原来的“三合一”要求。在悬臂状态下挖深6 m后, 墙顶变位也仅为1.5~2.0 cm; 挖到10 m深, 到达基坑底以后, 位移达到2.5 cm以后, 不再增加。由于沿基坑地连墙周边的15根条桩紧贴地连墙, 在墙体承受外侧土、水压力时, 起到了

表6 条桩和圆桩对比表

Table 6 Comparison between panel pile and circular pile

类别	根数	断面/m	有效长/m	混凝土/m ³	承载力/t	静压承载力	单位混凝土承载力	
							t/m ³	2期
条桩	54(实)	2.5×0.6	24	1 944	750~850(估)	1 050~1 300	29.2~36.1	1台抓斗31 d
圆桩	182	Φ0.8	24	2 184	220	—	18.3	6台钻机30 d(估)

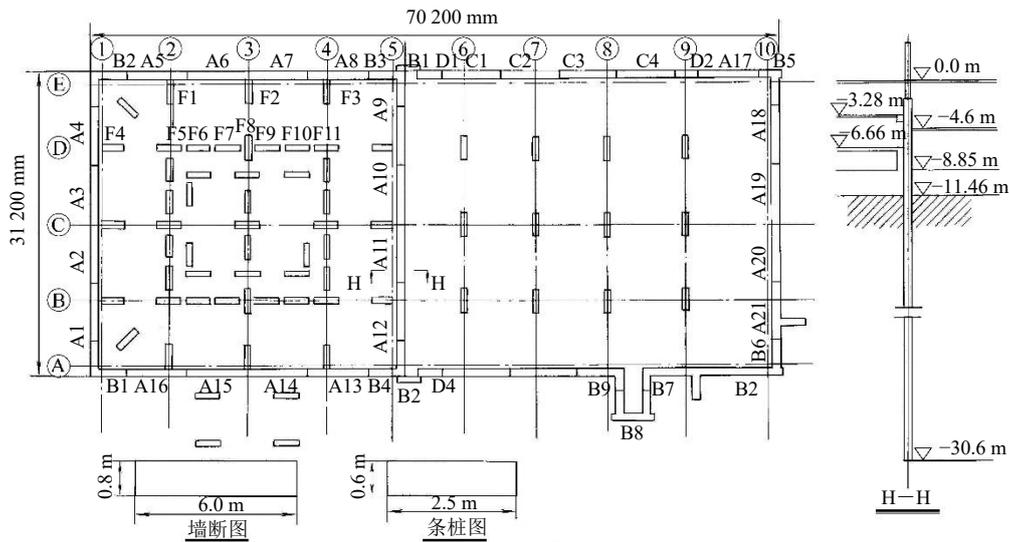


图5 大厦基础平面图

Fig. 5 Foundation plan of the building

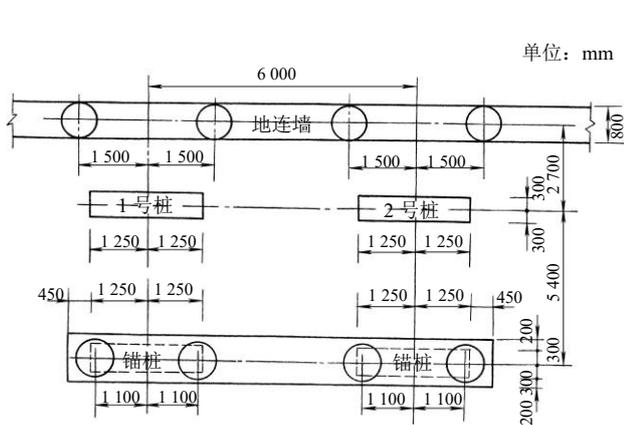


图6 试桩平面图

Fig. 6 Planar graph of test piles

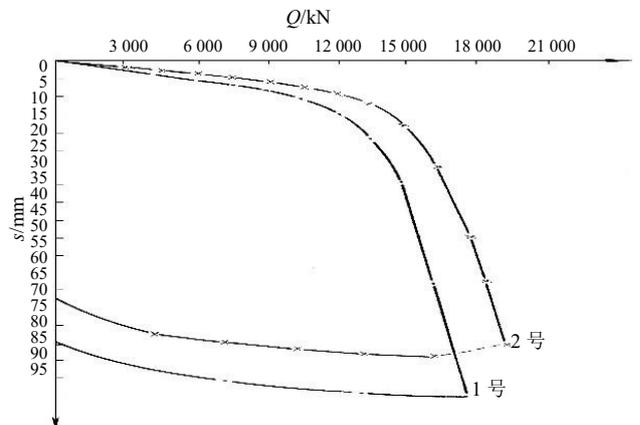


图7 静压桩的Q-s曲线

Fig. 7 Q-s curves of static pressure pile

有力的反向支承作用，这是墙体变位较小的主要原因之一。

开挖后对条桩进行观测，发现其混凝土质量非常好，而且表面平整，角部垂直，其长边或短边的尺寸约增加 2~3 cm。

主楼已经于 1995 年 8 月封顶，基础桩和地连墙均已承受全部荷重，1997 年开始营业，至今未发现任何异常现象。

4.3 排涝泵站中的 T 形地连墙

1996 年，笔者对浙江海宁盐官的钱塘江左岸排洪闸和排涝泵站边墙设计断面进行优化以后，建成了国内第一道大形的 T 形地连墙（见图 8），基坑开挖深度 12 m。地基是一种淤泥质黏土。由于河道宽度 100 多厘米，不宜采用内支撑；由于地基是软土地基，无法采用锚索结构；经过比较以后，采用了 T 形地连墙结构形式。地连墙的肋板只布置在弯矩较大部位（见图 9）。地连墙开挖示意图见图 10。排涝泵站设在右岸，其上部还有 3 层水泵、管理和观光楼层，地连墙要承受垂直荷载；是深基础结构。

4.4 非圆形地连墙桩

为了适应目前基本建设工程中对大口径灌注桩的需要，实现桩基工程的快速施工，缩短建设工期，降低工程造价，减少环境污染，笔者根据多年来的技术设想，从 1992 年开始，利用引进的液压抓斗的特性，设计、开发和应用了条形桩、T 形桩和十字桩等非圆形大断面灌注桩技术。

(1) 北京东三环双井立交桥梁条桩

这是国内第一次在桥梁基础中采用液压抓斗施工的非圆形大断面桩，每个桥墩的垂直荷载为 1 000~1 100 t，原设计每个承台有 4 根 $\Phi 1.2$ m 圆桩。经验算后，可用 2 根 2.5 m \times 0.8 m 条桩来代替。经现场大应变试桩（2 根）验证，单桩极限承载力可达到 1 500 t 以上。采用条桩可节约 13% 的混凝土。另外本工程的地质条件较差，特别是底部的砂卵石多且厚，回转钻或冲击钻施工很困难，平均 3~7 d 左右才能完成 1 根 $\Phi 1.2$ 的圆桩，而条桩每天可以完成 34 根，其效率提高十几倍，大大缩短了工期，为后续工作提前腾出工作面。

在双井立交桥下采用了 52 根条桩（见图 11），桩长 26~35 m。使用 BH7 和 BH12 液压抓斗挖孔，总平均工效为 73.5 m²/d。施工工效最高达 5.7 m²/h。

(2) 大北窑地铁车站十字桩

大北窑地铁车站是复兴门-八王坟地铁的一个大型车站。站场长度 217 m，地下结构宽 21.8 m，开挖深度 16.88 m。本车站采用盖挖法施工，车站两侧地连墙已经完工，唯有中间的 56 根十字桩尚未完成。

十字桩的施工难度大，特别是要把 2 个分别开挖的条形槽弄得互相垂直，并且下入 1 个相当大的十字形钢筋笼和 19 m 长的 $\Phi 1.3$ m 的钢护筒（见图 12），决非易事。

原设计十字桩 3.0 m \times 3.0 m \times 0.6 m，侧面积 11.46 m²/m，底面积为 3.77 m²，与 BH12 抓斗开度（2.5 m）不符合。

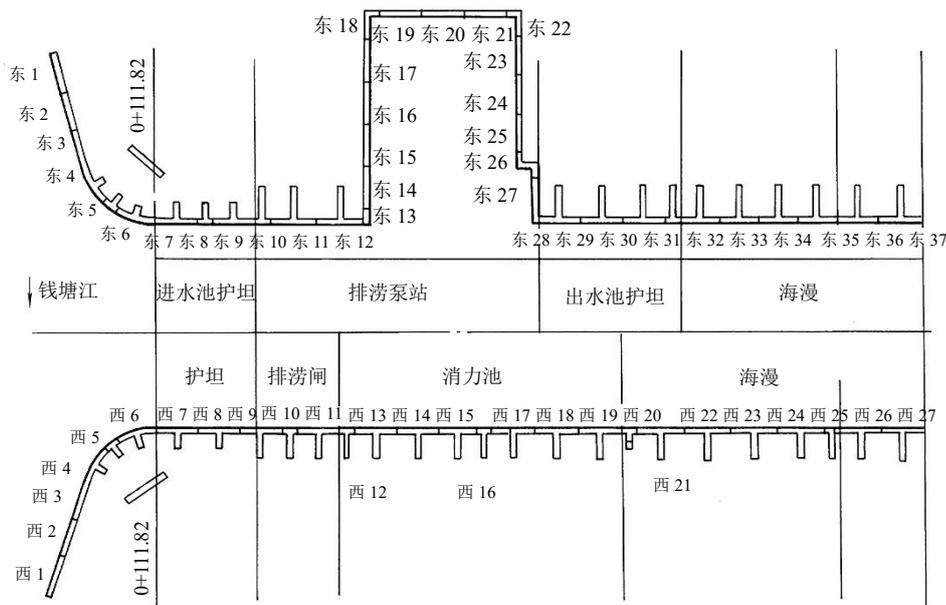


图 8 T 形地连墙平面图

Fig. 8 Planar graph of T-shaped diaphragm wall

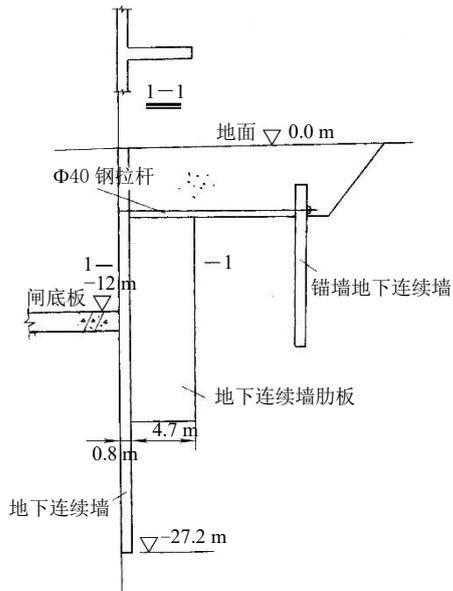


图9 T形地连墙剖面图

Fig. 9 Profile of T-shaped diaphragm wall

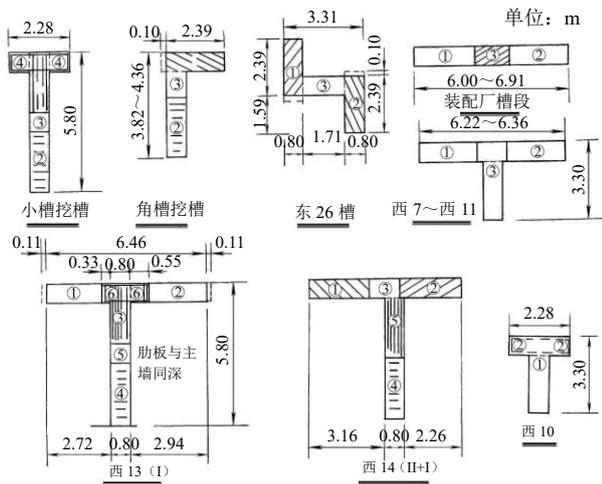


图10 挖槽示意图

Fig. 10 Schematic diagram of trenching

实际施工时,把原设计变更为 2.85 m×2.85 m×0.6 m,在抓斗体外边各加上一个短齿,使展开后宽度达到 2.85 m,在导板外侧再焊上小导板,使其外缘总宽不大于 2.80 m,用来修整壁面。安装时要保证 2 个短齿安装高度之差不大于 1.5 cm。

施工中还采用 CZ-22 冲击钻机带一个直径 1.37 m 的长钻头来扩孔,以便吊放直径 1300 mm 的钢筒。验收合格后,把十字形钢筋笼和 19 m 长的钢筒分别吊放入孔;钢筒埋入混凝土内的深度不小于 1.0 m。混凝土浇注以后,抽出钢筒内的泥浆,人进入钢筒底部,凿除混凝土,安装直径 700 mm 的钢管柱底座;最后安装好钢管柱以后,向钢管柱内灌注混凝土,成为地铁候车大厅的柱子。

施工中使用了 1 台 BH12 液压抓斗,在 70 d 内共完成了 39 根十字桩。

(3) 潮白河大桥的地连墙群桩

北京市的京承高速路潮白河大桥全长 920 m,由东引桥、主桥和西引桥 3 部分组成。主桥为长 384 m 的三塔矮塔斜拉桥,总体布置(见图 13)。两侧引桥各有 7 个桥墩,长 268 m。潮白河大桥基础位于新近沉积和第四纪的冲洪积地层中,地基中 85% 以上都是卵漂石,粒径达 450~600 mm,钻孔难度很大。冬季地下水水位为 21 m,埋深 8~15 m。

设计原拟采用直径 1.2 m 和 1.8 m 的圆桩,因地基中卵漂石含量太多太大,准备使用几十台冲击钻机来造孔,施工难度相当大,无法按时完成;遂改为直径 14 m 的沉井进行招投标。沉井在这种地层中很难施工,不仅卵漂石多且大,很难保证沉井均匀下沉;更重要的是由于地基的透水性很大,万一需要调整沉井偏斜时,无法把水排干(后来现场抽

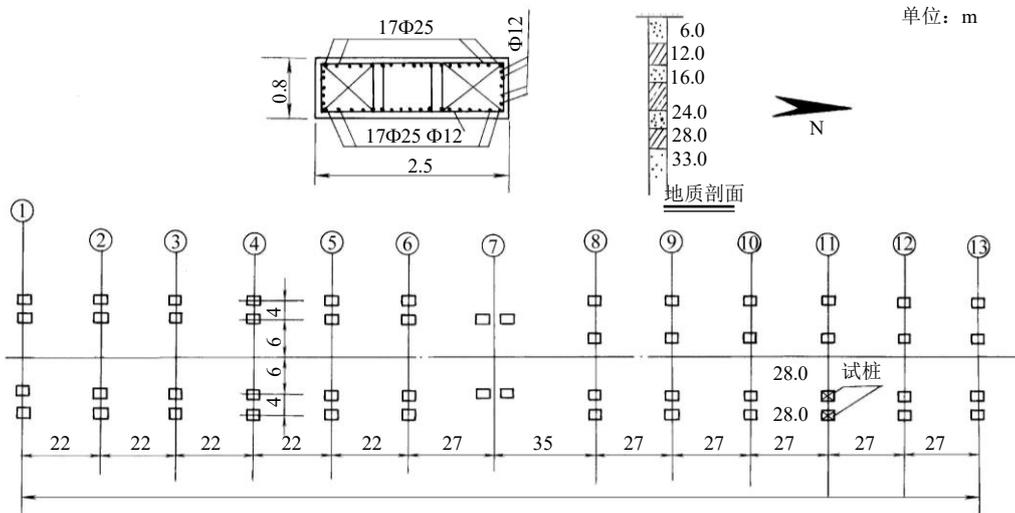


图11 桩基础平面图

Fig. 11 Planar graph of pile foundation

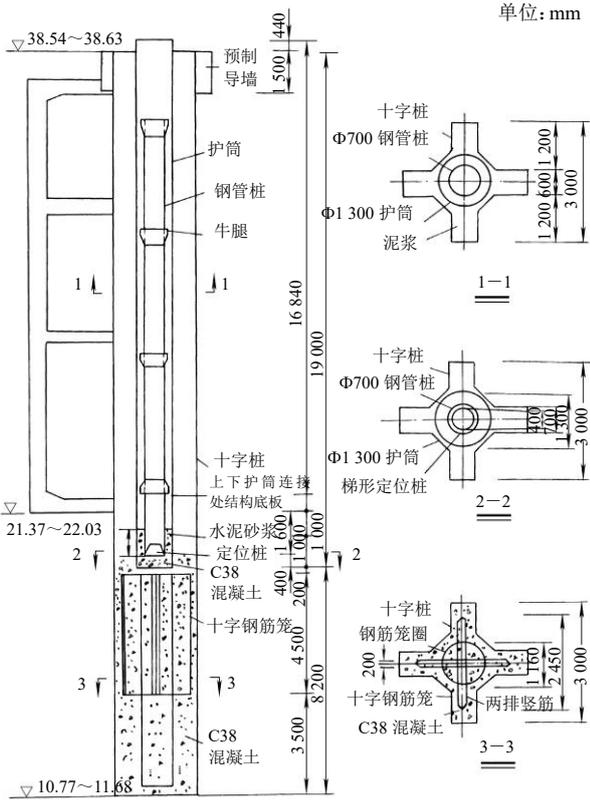


图 12 十字桩设计图

Fig. 12 Design drawing of cross pile

水试验的确发现水位根本没有降, 无法把沉井内水抽干来处理沉井事故); 如用潜水员到水下调整, 困难也很大。为此设计院接受笔者建议, 选用条桩作为新的桩基础方案, 并要求首先通过条桩成孔试验

来验证其可行性。

2004 年 2 月中旬, 用 12 d 时间完成了 2 根条桩的挖孔试验工作, 证明采用条桩是完全可行的。

如前所述, 设计院曾考虑采用大直径的圆桩和直径 5 m 和 14 m 的沉井, 现在又加上条桩等共 3 个方案进行了技术经济比较 (见图 14)。

以主桥中墩 9 号墩为例进行比较, 其最大垂直荷载为 14 000 t。各方案的指标见表 7。

4.5 井筒式基础

目前已经有很多工程采用了井筒式地连墙基础。有的作为悬索桥锚碇结构, 如润扬长江大桥北锚碇; 武汉阳逻长江大桥的南锚碇; 广州黄埔大桥悬索桥的南、北 2 个锚碇; 南京四桥的 8 字形锚碇; 有的作为各种隧道的施工进出口, 如南水北调穿越黄河输水隧洞的两岸施工竖井; 输水隧洞盾构的施工竖井等; 还有的应用与各种地铁、管道的施工竖井等。下面以广州黄埔大桥悬索桥的南、北锚碇为例介绍井筒式地连墙基础。

珠江黄埔大桥是广州东二环高速公路跨越珠江的重要工程。珠江的江心洲-大濠沙岛将珠江黄埔大桥分为北汊桥及南汊桥, 即北汊桥 383 m 独塔双索面钢箱梁斜拉桥+南汊桥 1 108 m 单跨悬索桥。南汊桥采用双塔单跨钢箱梁悬索桥, 跨径组成为 290 m+1 108 m+350 m。北锚碇位于大濠沙岛上; 南锚碇位于南岸阶地上。锚碇结构见图 15。

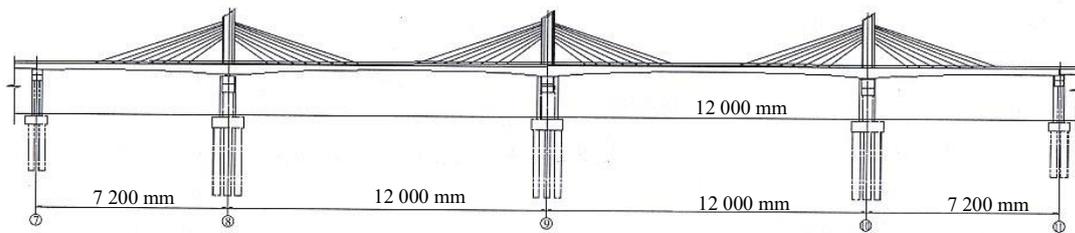


图 13 主桥立面图

Fig. 13 Elevation drawing of the main bridge

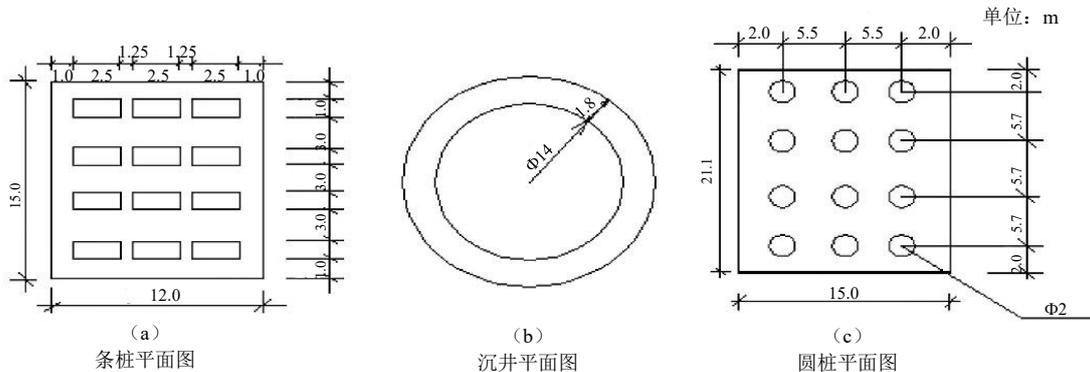


图 14 桩基方案比较

Fig. 14 Comparison of pile foundation schemes

表7 桩基方案指标比较

Table 7 Comparison of indicators of pile foundation schemes

种类	沉井	条桩	圆桩	地连墙井筒
规格/m	$D=14, H=15$	$n=12$ 根, $H=26, 2.5 \times 1.0$	$n=12$ 根, $H=26, d=2$	$12.5 \times 12.5 \times 1.2$
混凝土/ m^3	1 490	1 476	2 246	1 534
底板混凝土/ m^3	270	—	—	270
钢筋/t	87.7	144	224.0	191.6
工期/d	63	22	—	66
说明	入水 7 m	—	承台 $21 m \times 15 m \times 4 m$	—



图 15 黄浦大桥锚碇基础

Fig. 15 Anchorage foundation of Huangpu Bridge

原设计没有充分考虑基坑渗流和承压水影响；墙底入岩深度没有考虑渗流影响；不一定非要穿过 18 m 厚的坚硬花岗岩；可以考虑在墙底进行帷幕灌

浆。根据本工程特点，进行了专门的基坑渗流计算。主要采用了三维空间有限差分法、平面有限元法，和简化计算法，其中简化计算法见图 16。

墙底入岩深度 h_d 的大小关系到基坑工程安全和工程造价，需要慎重选择。墙底入岩深度 h_d 不但要满足基坑和墙体的稳定和强度要求，还要满足渗透稳定要求，也就是要满足平均渗透比降和最大出逸比降以及抗突涌的要求。

渗流分析计算结果表明，2 个锚碇处的弱风化岩透水性较大，属中等透水层，不能作为防渗止水层。最后采用在地连墙墙底部设置水泥灌浆帷幕，深度 10~15 m，进入微风化岩层内 1.5 m，见图 17。

帷幕为 2 排，错开布置，最小孔距 1.4 m。北锚碇压水试验结果显示，单位吸水率 $q=3.2 L_u$ ，一般水泥浆难以灌入岩层，可考虑采用磨细水泥或改性水玻璃浆液灌浆；南锚碇基岩透水性大，单位吸水率 $q=17.8 L_u$ ，可以用水泥灌浆帷幕；灌浆压力不宜小于 3 MPa。

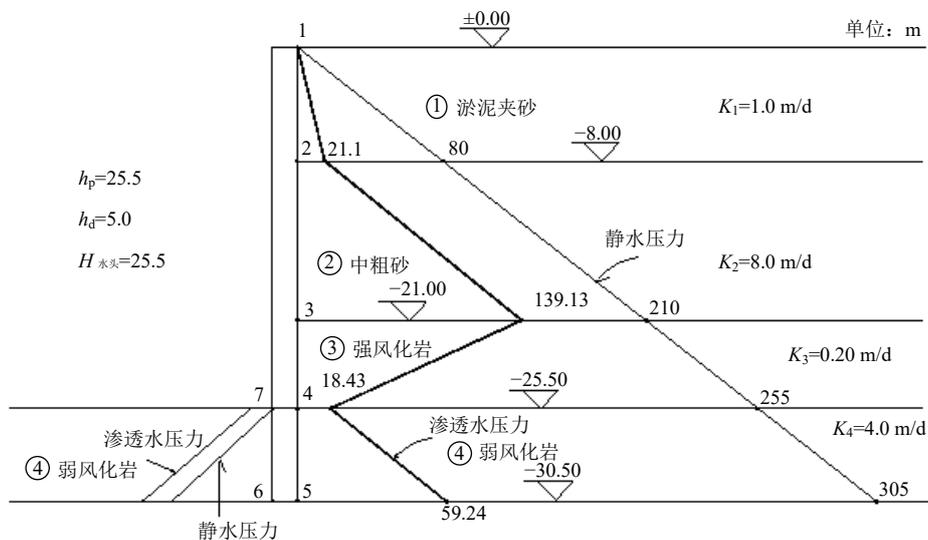


图 16 渗流分析计算图

Fig. 16 Analysis of seepage calculation

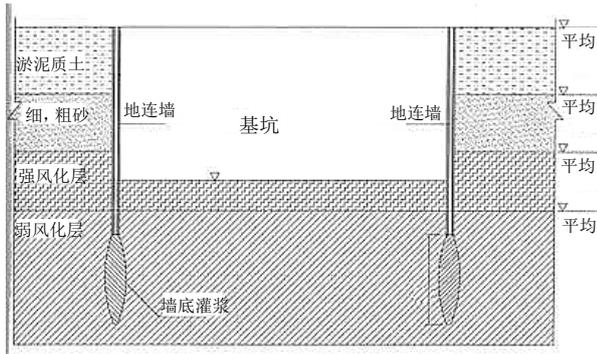


图 17 灌浆帷幕设计图

Fig. 17 Design drawing of grouting curtain

4.6 框格式地下连续墙和大直径灌注桩组合的深基础

雅砻江桐子林水电站是二滩水电站的反调节电站，是一座河床式水电站。河道宽度约 200 m，每天都有二滩水电站的发电尾水通过，占用了河道左岸大部分；对于桐子林水电站右岸明渠导流施工很不利。

导流明渠所在地段的覆盖层深度约 34 m，明渠靠近河道中心线的挡墙高度约 24 m。显然在该工程现场环境条件下，明挖 30 多米深的基坑，再从基坑底部浇注 50 多米的高墙相当困难。

(1) 导流明渠基坑方案比较

首先对导流明渠的基坑方案进行了比较。设计

时曾提出采用地连墙沉井（竖井）方案，该方案主要存在竖井互相搭接和开挖困难等问题，而且为解决 34 m 深的井底渗流稳定，风险大。如果采用框格式地连墙，可以解决这个难题。最后对框格式地连墙深基础和框格式地连墙与大直径灌注桩组合的深基础方案进行比较。

a) 框格式地连墙深基础方案

此方案是布设纵向 4 道、横向 12 排的地下连边地连墙兼作防渗结构。明渠的左导墙和底板做成 L 型挡土墙结构，支撑在框格式地连墙基础上。

此方案关键点是十字交叉点的地连墙设计和施工方法，特别是如何保证同样是厚度 1.2 m 的十字型地连墙（一共有 26 个）4 个方向的接头孔准确定位，以及 T 字型、直角型等厚地连墙准确定位问题，难度很大。曾经提出了加厚十字接头地连墙厚度的方案（见图 18），由于位于岩石中厚度 1.8 m 的矩形地连墙，目前在国内难于实施，最终只好放弃。

b) 框格式地下连续墙和大直径灌注桩的组合深基础

笔者提出用大直径灌注桩代替交叉点处的等厚地连墙方案（见图 19）。本方案不必开挖深基坑，采用厚度 6~8 m 的混凝土厚板和边墙组成的 L 形结构，与组合深基础共同承担垂直和水平荷载。

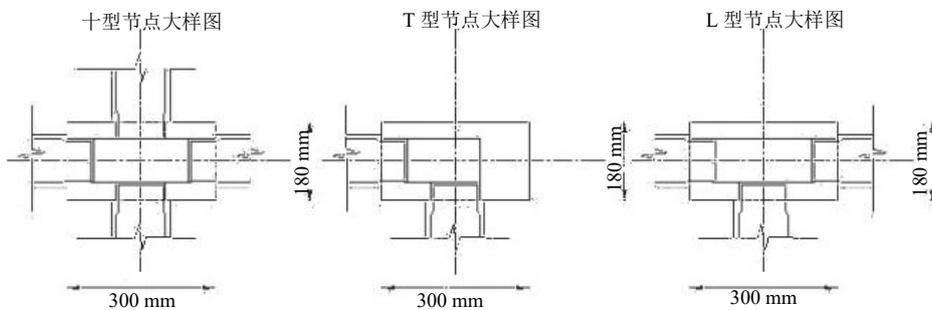


图 18 加厚地连墙详图

Fig. 18 Details of thickened diaphragm wall

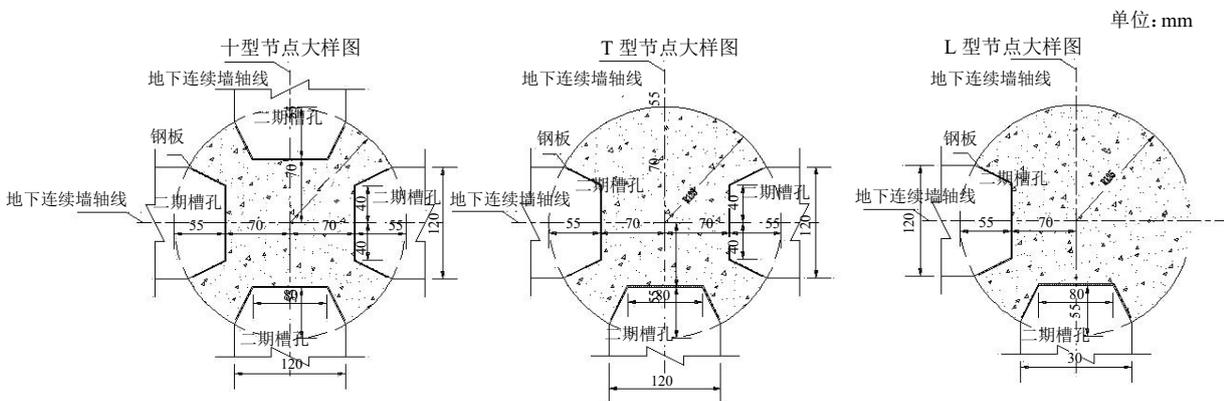


图 19 圆桩平面图

Fig. 19 Planar graph of round pile

经过现场钻孔和成桩试验,证明此法完全可行;最后采用了本方案,即用框格式地下连续墙和大直径灌注桩组合的深基础,代替 34 m 覆盖层的开挖。组合深基础工程建成后,只要在河床表层开挖 6~8 m,浇筑混凝土底板和边墙,而不必深开挖。

导流明渠方案于 2008 年开始设计,经过多次评审后,2011 年按按照组合深基础方案施工,当年过水;第 2 年完成 2 期导流工程,当年过水考验,完全达到了设计要求。

5 结 论

(1) 地下连续墙深基础已经成为现代大型工程的主要基础形式;可以在困难的地质和周边环境条件下建成运行。

(2) 地下连续墙深基础可以分为封闭式(井筒)和开敞式(一字、十字、丁字桩)2种断面形式;已经有成熟的设计、施工经验,可以完成各种形式的地连墙深基础工程。

(3) 地下连续墙通常采用液压或钢丝绳抓斗、双轮铣槽机,配合以重锤、旋挖钻或冲击钻机来建造;对施工设备、施工工艺和工程质量有较高要求。

(4) 今后应深入研究地下连续墙的原理和计

算方法,优化设计和施工方案,使其得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 丛蔼森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 丛蔼森. 三合一地下连续墙和非圆形大断面桩基的开发和应用[J]. 北京水利: 1997(1): 26-28.
CONG Ai-sen. Development and application of three in one diaphragm wall and non circular large section pile foundation[J]. Beijing water conservancy: 1997(1): 26-28.
- [3] 丛蔼森. 地下连续墙液压抓斗成墙工艺试验研究和开发应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 1997(5): 41-44.
CONG Ai-sen. Development and application of the diaphragm walling technology using hydraulic grabs[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 1997(5): 41-44.
- [4] 丛蔼森, 杨晓东, 田彬. 深基坑防渗体的设计施工与应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 2012.
- [5] 日本土质工学会. 地中连续壁工法[M]. 东京: 1988.
- [6] (日文)基础工特集, 1995-2010; 2011-2015.
- [7] XANTHAKOS P P. Slurry walls as structural systems, 2nd ed[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.