

文章编号: 0451-0712(2005)10-0017-05

中图分类号:U442.5

文献标识码:B

## 承台临水深基坑支护结构的设计计算

曹信红, 王 涛, 卢 静

(路桥集团第一公路工程局 北京市 100024)

**摘 要:** 结合灌河大桥主桥南岸承台深基坑开挖支护方案的选择及设计计算,介绍了在方案选择中,锁口钢管桩围堰和双排钢管桩支护两种承台深基坑支护方案的计算思路、技术特点,及桥梁承台临水深基坑支护结构设计计算中的一些关键问题。

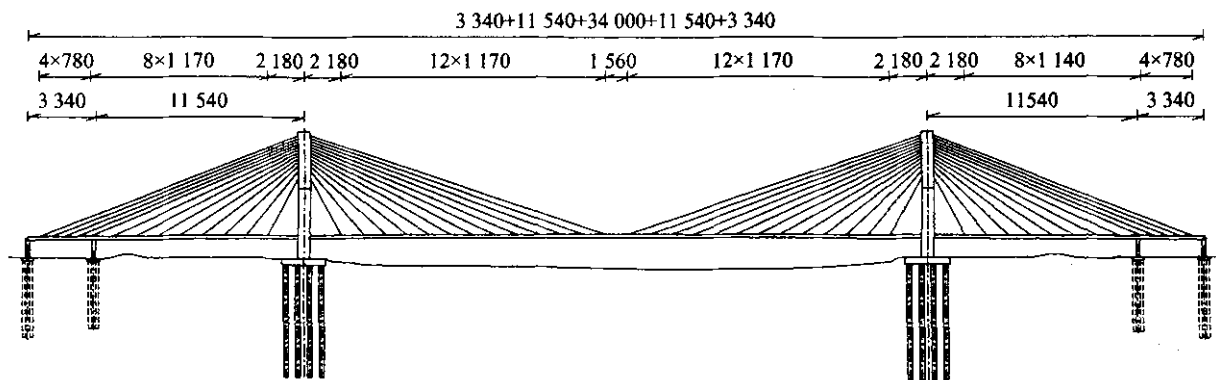
关键词: 桥梁; 承台; 临水深基坑; 支护结构; 设计

我国是一个水网众多的国家,许多道路都要跨越江河,特别在我国的东南部地区,几乎每一条道路必须通过桥梁连接。许多大型或特大型桥梁的承台就坐落在河堤上或河堤附近。承台施工时,基坑必须采取必要的围护方式,这种基坑是典型的近堤岸基坑,而这种基坑支护一般都具有防洪的任务,其重要性不容质疑。本文主要阐述了灌河大桥主塔承台基坑工程,在支护形式的选择和施工方案设计计算中主要考虑的问题。通过对几种适用于临水深基坑支护结构形式进行的专门研究,经多方案比较,最终选定了适用于岸上及水中施工支护的锁口钢管桩围堰结构,作为承台基坑围堰及开挖支护结构。一次成功,效果良好。

双塔双索面钢-混凝土组合梁斜拉桥,如图1所示。主桥索塔为钢筋混凝土H形塔。该工程位于海积平原区,河漫滩地面标高为3.50 m,平整后基坑地面高程为+2.5 m。索塔承台为工字形平面,承台尺寸为24 m×59.6 m,承台高6 m,承台顶面高程为+2.0 m,底面高程-4.0 m,基坑尺寸为26 m×61.6 m。该桥位处设计通航水位1.97 m,最高通航水位3.74 m。灌河潮位属规则的半日潮,最高潮位4.27 m,最低潮位-2.27 m,最大潮差4.98 m,最小潮差0.78 m。基坑深度范围内地质情况依次为:淤泥、亚粘土、粉砂。

索塔位于河漫滩岸边,索塔承台一面临水,承台处于潮水活动范围之内,为保证承台施工在无水状态下进行,需考虑用围堰将水隔离。大桥施工中,围堰通常作为一项重要的单项技术来设计,围堰方案与设计关系着桥梁施工的成败,影响整个桥梁的工期和造价。

## 1 灌河大桥主桥南岸墩位工程概况及地质条件



单位:cm

图 1 主桥总体布置

## 2 承台临水深基坑的设计原则

该工程开挖基坑是典型的近堤岸临水深基坑。即基坑上部三面挡土开挖支护、一面临水围堰,如图2所示。基坑四边非均匀受力,差异很大,在开挖中需充分考虑基坑开挖支护和挡水围堰两方面因素。近堤岸基坑通常可采用板桩、排桩、地下连续墙、重力式挡墙等围护型式,也可采用双排桩围护结构。水中围堰施工常采用沉井、沉箱、双壁钢围堰、钻孔桩围堰、锁口钢管桩围堰等结构形式。

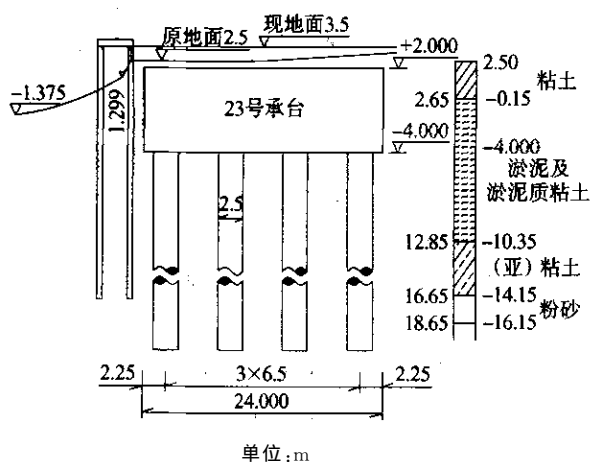


图2 承台布置

经现场调查和多次技术研讨,确定了以下的设计原则和方法。

(1)采用上部施工临时结构所需要的钢管桩作为支护结构,一方面钢管具有施工方便的特点;另一方面可降低造价。

(2)为扩大工作面,加快施工进度,尽量减少内支撑层数,在计算可能的情况下,可考虑不采用内撑,以方便施工。

(3)分别以岸侧土压力和临水侧水压力做最不利荷载组合,临水侧水压力则按高潮位对围堰支护结构的受力和低水位时内支撑对围堰结构的整体推移分别计算,其中不排水开挖,考虑以下几种不利工况进行验算:

- ①不排水开挖至封底混凝土底面高度;
- ②封底混凝土施工完成;
- ③封底混凝土达到设计强度后,完成围堰内抽水;
- ④浇筑第一层混凝土。

(4)排水开挖,分别计算3层支护、2层支护、单层支护和悬臂自撑,经计算,该深基坑单层桩悬臂自撑不可取,若选用悬臂结构,按照双排钢管桩计算。单排锁口钢管桩考虑以下几种不利工况进行验算:

- ①开挖至第1层支撑面支撑前受力;
- ②支撑第1层;
- ③开挖至第2层支撑面支撑前受力;
- ④支撑第2层;
- ⑤开挖至第3层支撑面支撑前受力;
- ⑥支撑第3层;
- ⑦开挖至基地;
- ⑧封底;
- ⑨拆第3层内撑;
- ⑩浇第1层混凝土;
- ⑪拆第2层内撑;
- ⑫浇第2层混凝土;
- ⑬拆第1层内撑。

## 3 临水深基坑开挖支护结构的设计内容及顺序

(1)收集设计资料。桥址处气象、水文、地质资料、设计资料、加工制造、运输、吊装、桩锤等有关数据等。

(2)围堰设计参数:土压力、水压力、波浪力、风力参数等。

(3)试算并确定支护方式与施工顺序。

(4)计算围堰内挖土和抽水时钢管和内支撑的应力,确定是否安全。

(5)确定围堰内封底混凝土的厚度。

(6)绘出围堰施工支护方案图,拟定钢管桩直径、挡水或降水方式、支撑间距、平面布置等。

(7)围堰应力计算。

(8)以桩中心宽度换算成每根钢管桩的弯矩和支撑反力,检算桩的应力,设计或检算支撑。

(9)检算围堰在土压力、水压力、风力、波浪作用下的抗倾覆能力(水土合算、水土分算)。

(10)整体稳定性验算。

(11)坑底抗隆起验算等。

## 4 主要方案比选及最终确定的围堰总体布置方案

通过对工程地质条件、周围环境、开挖深度、水文地质、施工作业设备的具体分析,该基坑位于河岸,且基坑主要处在淤泥土层中,不宜采用拉锚体系支撑。承台基础主要是在土中开挖施工,深水基础围堰不适用,因此对本工程主要选择了以下两个方案进行比较。

方案一:采用双排桩围护结构。双排桩围护是一种新型的围护结构,如图3所示。它是由2排平行的

桩以及在桩顶的压顶梁和联系梁形成的空间门架式围护体系。这种结构具有较大的侧向刚度,能有效地限制侧向变形,不需架设内支撑,挖土方便,施工快捷。采用钢管桩刚架支护方案整体自稳性好,可有效地限制围护结构的侧向变形,节省内支撑、围圈及立柱,对开挖及承台大体积混凝土浇筑无干扰,对永久工程不产生任何妨碍和影响,还可缩短施工工期,给施工带来很大方便。缺点是自身不具备围水能力,需配合筑岛、围堤、降水、止水结构。双排桩围护结构在陆地建筑物上应用的成功经验和本桥位设计计算结果,该方案可行,并具有经济性及施工方便等可取之处;但是,桥位所处地区石材靠远程运输,造价较高,现场采用木桩浅打不能形成可靠的施工条件,前期工作困难重重。

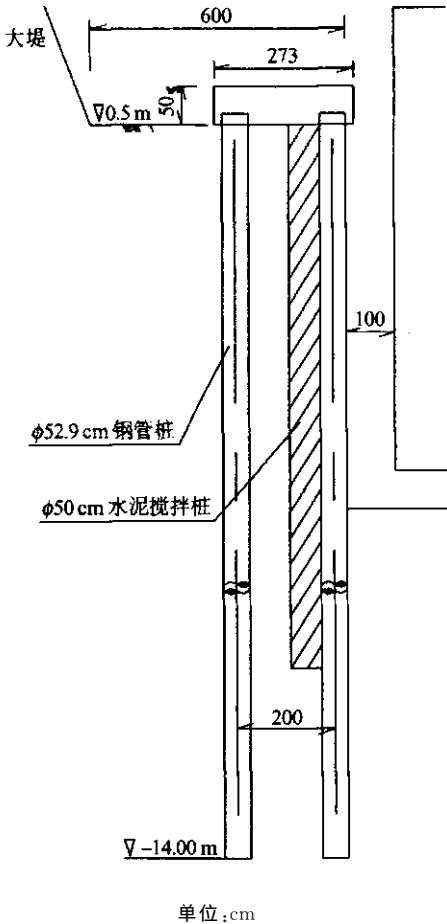


图3 双排桩围护结构

方案二:采用单排钢管桩结构。桩间联结采用锁口形式用以挡水,其桩径强度必须足以抵抗水平土压力,侧向变形要有限制。单排悬臂钢管桩不足以满足强度、刚度要求时,采用围圈及内支撑,但要尽量减少层数,以方便承台浇筑。锁口钢管桩围堰属井筒

基础受力模型,抗弯刚度界于桩基础和沉井基础之间,故其计算方法也是按弹性地基上的有限长度的梁来考虑。施工中钢管桩圆形围堰在垂直方向上荷载极小,基本上只有自重影响,验算时不予考虑。围堰所承受的主要荷载是水平方向上的波浪冲击力、潮水的流水侧压力、风力及地基反力,不考虑船舶碰撞和涨落潮水位差对土压力的影响。

锁口钢管桩围堰有如下优点:

- (1)锁口钢管桩配合锁口的处理,兼支护、围水于一身;
- (2)适用于各种复杂地质、地层,受地质条件限制少;
- (3)施工速度快,制作、加工、运输、吊插、下沉等方便灵活,工艺简单,所需设备少,钢管虽一次性投入大,但可重复使用,比较经济;
- (4)可根据需要,组装成各种形式的围堰;
- (5)截面刚度大,使围堰内支撑减少,适应大体积承台的施工。

锁口钢管桩的缺点是所使用的锁口挡水效果不是非常可靠,且易形成锁口钢管桩不对称,产生倾斜。

经过多次综合计算分析及综合经济技术比选,根据工程特点及现场施工条件,主桥索塔承台采用单排单层内支撑锁口钢管桩围堰进行施工,如图4所示。并以现有的 $\phi 72$ 钢管桩作为该承台围护的主要受力结构,排水开挖。按照受力计算要求,设置单层内支撑,纵、横向通长设置,支顶在围圈上,与锁口钢管桩、围圈形成连接,以抵抗围堰外侧水、土压力,在潮位最低时提供拉力。环绕围堰设置围圈,围堰主要靠锁口构成整体,围圈只起整合成形作用,不考虑受力。围圈上设内支撑,由于基坑尺寸较大,内支撑长度长,内支撑的下挠,产生变形失稳,计算结果要求,内支撑须设置竖向支柱以增加刚度,立柱埋置于混凝土中的部分作为永久支撑,部分立柱支撑在桩基的桩头上作为临时支撑,索塔桩基承受内支撑自重下的竖向力,不承受横向应力,不会产生不可逆转的永久变形,对永久结构受力及变形不会造成影响,封底混凝土达到一定强度后,拆除临时支撑。

围堰的受力主体为 $\phi 72$ 锁口钢管桩,围圈并排用2根I40b工字钢,置于锁口钢管桩内侧预设牛腿之上,内支撑采用 $\phi 720 \times 10$ 钢管。

按照《建筑基坑支护技术规程》中第3.1.8条规定,基坑采用局部放坡,在棱体破裂面以外,从地面线放坡,再进行支护、开挖。

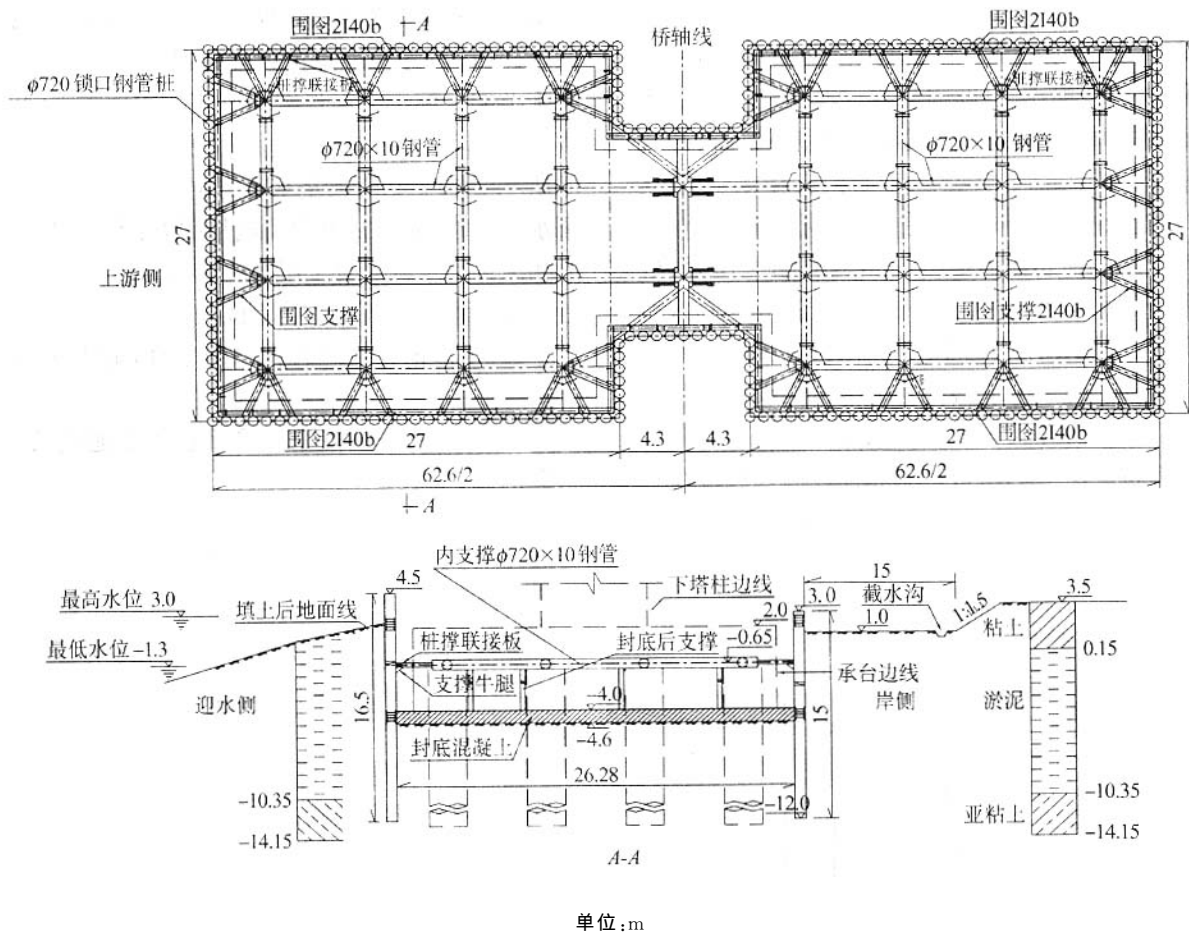


图4 实施的锁口钢管桩围堰方案

## 5 设计中的几个关键问题

随着电子技术的发展,结构计算的电算化变得非常普及,本支护方案中我们借助了韩国的 midas 软件进行受力分析,用以检算强度、刚度,借助同济大学的启明星、PRBK 等软件进行辅助设计。

### 5.1 封底混凝土厚度计算

封底混凝土厚度要足够保证抵抗向上的水压力,提供足够的重力,抵抗围堰内抽干水后受到的浮力作用。而封底混凝土厚度的增加,则加深基坑的深度,相应地增加了基底的开挖量,同时需加强钢管桩长度、刚度及强度。减薄混凝土厚度是削减弯矩值的参数之一,要求封底混凝土,厚度要保证围堰不漏水,还要确保封底混凝土具有一定的密实度、均匀性以及强度,封底混凝土与围堰内壁、钻孔桩外壁紧密结合。其厚度计算可参考沉井等封底混凝土厚度计算公式及原则。

### 5.2 锁口钢管桩计算

#### 5.2.1 单根钢管桩入土深度的计算

承受水平力和力矩的单根钢管桩,其入土深度

需满足弹性长桩的要求:

$$L_i \geq 4T, T = \sqrt[5]{\frac{E \cdot I}{m \cdot b}}$$

式中:  $T$  为桩的相对刚度系数;  $E$ 、 $I$  分别为钢管桩的弹性模量和截面惯性矩;  $m$  为桩侧地基土水平抗力系数随深度增加的比例系数,对液性指数  $I_L \geq 1.0$  的流塑淤泥质粘性土;  $b$  为桩的宽度。经计算确定钢管桩的入土深度。

#### 5.2.2 流水侧压力

作用于水中钢管桩围堰的流水侧压力按下式计算:

$$P = K \cdot A \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2g}$$

式中:  $K$  为围堰的形状系数,圆形取  $K = 0.8$ ;  $A$  为围堰的阻水面积;  $V$  为水的流速,取桥位断面处最大原形水文观测流速。

流水侧压力的合力作用点位于水位线以下  $1/3$  水深处,计算后确定围堰所受到的流水侧压力。

#### 5.2.3 水平地基反力

按弹性地基梁理论,可假定钢管桩围堰前面的水平位移与水平地基反力成比例,其地基系数在地

面(最低冲刷线)处为零,且随深度成正比例增长。

围堰在土中的基础变形系数是:

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{E_P I_P}}$$

式中:  $m$  为地基土的比例系数,仍取  $m = 4\ 000\ \text{kN/m}^4$ ;  $b_1$  为围堰的计算宽度;  $E_P$ 、 $I_P$  为围堰的弹性模量和总惯性矩,因围堰由若干锁口钢管组成一个整体,故其抗弯刚度用下式计算。

$$EI = E \left( \sum_{i=1}^n I_i + \mu \sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i^2 \right)$$

式中:  $A_i$  为单根钢管的净断面积;  $\mu$  为组合系数,取 0.6;  $I_i$  为单根钢管的惯性矩。计算确定围堰水平压应力,使  $\sigma_y$  满足地基的容许应力要求。

#### 5.2.4 钢管桩的选用及锁口设计

初拟钢管截面尺寸必须符合《钢结构设计规范》(GBJ17-88)的规定:钢管的直径与壁厚之比  $D/t \leq 100 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$  的要求。 $f_y$  为钢材屈服强度。A3 钢  $D/t \leq 100$ 。

锁口能否止水是围堰成败的关键之一,为保证锁口能止水,就要保证锁口有足够的强度不开裂。对锁口强度检算主要是受力分析难,为便于分析可假定:(1)2 根桩在同一平面内对称倾斜 1/100,造成锁口一端受拉,一端受压;(2)在平面外,2 根桩在相反方向各倾斜 1/100,锁口受弯、扭、剪;(3)一根桩下沉带动相邻桩下沉,锁口受剪;(4)管桩锤击下沉时,旋转使锁口受扭,旋转力按锤击力的 10% 考虑。以上各计算力的大小均以锤击力为基数。

### 6 施工效果及设计体会

在方案设计中拟定了检测内容、检测要求和应急预案,要求施工过程中进行基坑顶部沉降和水平位移观测、监测围护结构的应力应变。在监测中若基坑边坡出现裂缝、变形、局部滑塌、甚至滑动的失稳险情时,采取一定的防护措施,如:及时清除基坑周边地面堆置的砂石建筑材料和施工设施等,以减少地面荷载;坡脚压载,即在边坡底端采用堆置编织袋装土包等,以增加边坡抗滑力,维持边坡稳定;预留内撑预案等。实际施工非常顺利,未出现管涌、隆起及渗水等围堰常见的险情,受力构件变形在容许范围内,围堰的安全性比较高,使之提前于计划工期完成了承台施工。

一点浅显的个人体会是:围堰支护为临时工程,设计参数的选用可据实际情况,参照试验资料选定。如最高水位的确定中,围堰从支护开挖到承台施工结束,围堰即完成了历史使命,工期只有几个月,按照百年一遇洪水位来设计围堰是不是理性的设计呢?围堰低于洪水位,安全性无法保证,围堰过高,增加施工难度,增加内支撑数量,投入相应增大。按照施工计划,围堰施工恰好在年高潮水位期,随着施工计划调整,围堰施工改在了秋冬季,此时已过了大潮高水位季节,结合近几十年来的水文资料,采用了合理的设计水位。

### 7 结语

20 世纪 90 年代我国开始应用锁口钢管桩,随着我国大型桥梁的快速发展。而双排钢管桩基础作为一种实用的支护方式,已经在建筑行业施工地基基坑支护中得到应用与发展,在桥梁基础施工中尚未见到应用报导,所以作为本桥承台开挖支护的比选方案同样给予了探讨(限于篇幅,本文不做详细介绍),以探寻更多的施工方案。展望桥梁施工技术的发展,桥梁施工将突破过去的行业界限,如跨海桥深水基础可以借鉴结构合理且施工难度很大的海上石油钻井平台基础的施工技术,岸上基础可以应用精巧严密的建筑施工技术。尽管我国的桥梁建设已经进入世界先进水平,但在施工技术的精细化程度上,仍有很具操作性的发展空间。

### 参考文献:

- [1] 桥梁深水基础[M]. 北京:人民交通出版社.
- [2] 软土水利基坑工程的设计与应用[M]. 北京:中国水利出版社.
- [3] 深基坑支护工程设计技术[M]. 北京:中国建材出版社.
- [4] 深基坑支护设计与施工[M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- [5] 深基坑开挖中的双排桩支护结构的应用与探讨[J]. 地基处理,1993,(4).
- [6] 深基坑开挖中的双排桩支护结构的数值分析与工程应用[J]. 西安工程学院报,2002,(12).
- [7] 软粘土地基坑开挖中的双排桩支护结构的数值分析与工程应用[J]. 建筑结构学报,1999,(8).
- [8] JGJ120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
- [9] 深基坑工程施工手册[M]. 中国建筑工业出版社.