

# 苏通大桥北主墩钻孔平台方案设计

张 鸿<sup>1,2</sup>, 张永涛<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 武汉市 430000; 2. 中港二航局 武汉市 430014)

**摘 要:** 苏通大桥北主墩是全桥的控制性工程, 其地质水文条件极其复杂, 本文对北主墩基础钻孔平台的结构形式及施工方法进行探讨。

**关键词:** 苏通大桥; 北主墩; 钻孔平台; 河床防护

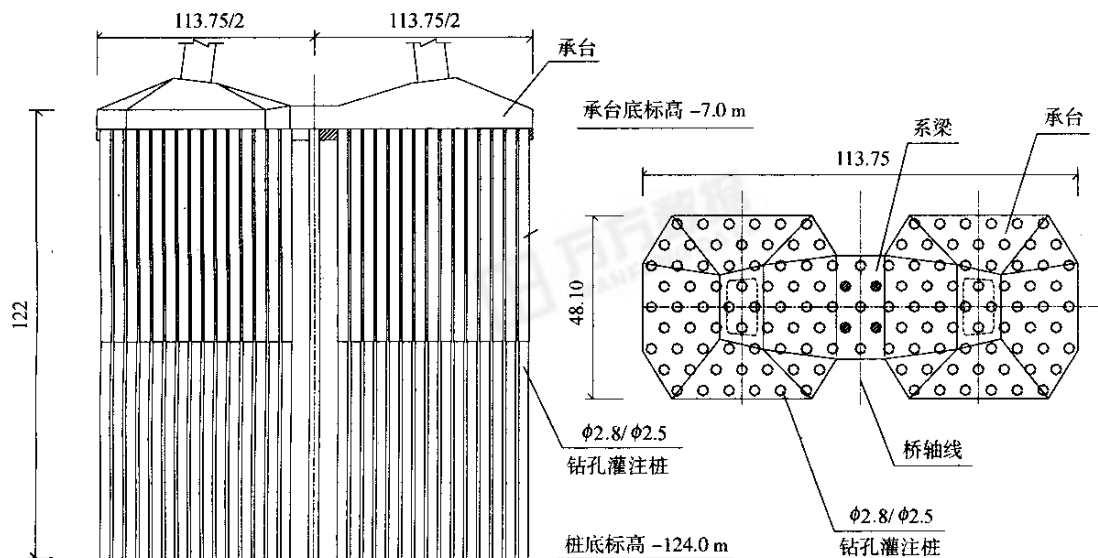
## 1 苏通大桥概况

苏通长江公路大桥主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥, 主跨为 1 088 m, 跨径居世界同类型桥梁第一, 代表中国桥梁建设技术的最高水平。主桥北主墩基础位于长江深泓地段, 距南北两岸均约为 3 km, 河床面标高 -28.0 m。

### 1.1 北主墩结构形式

主墩基础设计采用高桩承台式结构, 桩基由 135

根直径为 2.8 m/2.5 m 变径钻孔灌注桩组成(其中 4 根为备用桩位), 呈梅花形布置, 设计桩底标高为 -124.0 m, 桩顶标高为 -7.0 m, 桩长 117.0 m, 持力层为粉细砂, 为摩擦桩, 桩底后注浆。承台为哑铃形, 单个承台平面尺寸为 51.35 m(长)×48.1 m(宽), 其厚度由边缘的 5 m 变化到塔中处的 13.324 m, 2 个承台之间采用 11.05 m(长)×28.1 m(宽)的系梁连接, 系梁厚度为 6 m。结构形式见图 1 所示。



单位: m

图 1 北主墩结构

### 1.2 地质水文条件

桥址处于长江三角洲冲积区, 第四纪地层厚度大, 基岩埋深在 270~280 m 之间。其墩位处的上覆

土层主要由粉细砂组成。

桥址处于感潮河段, 一年内最小流量出现在 1 月, 至 4 月逐渐增大, 最大流量一般出现在 7 月, 10

月以后流量明显回落。汛期:6 月~9 月;平水期:5、10 月;枯水期:11 月~4 月。

## 2 提出基于当前建设技术的可行性方案

对于桥梁基础高桩承台施工方法,目前较多采用的是“钢吊箱”方案,即先搭设钻孔平台,在其上设置导向装置沉放钢护筒,在平台上进行钻孔灌注桩施工,拆除钻孔平台后分节或整体吊装钢吊箱,浇筑封底、承台混凝土,完成基础施工。近年来在深水基础施工中,又从钢吊箱方案中衍生出浮运钢吊箱技术,即在陆地或驳船上制作钢吊箱,浮运至墩位处,通过导向船、定位船(或锚墩)和锚固系统定位固定,利用钢吊箱上设置的导向装置沉设钢护筒,调整钢吊箱至设计位置,转换受力体系使钢护筒成为吊箱的支撑结构,在钢护筒支撑的钢吊箱上进行钻孔桩、承台施工。将钻孔平台与钢吊箱结构结合考虑,浮运钢吊箱既可作为钻孔平台,又可作为承台施工的挡水结构,缩短了钻孔桩施工与承台施工工序的转换时间。

在北主墩基础施工方案设计中,将根据现场气象、水文地质及建设条件综合考虑这两种技术方案的可行性。

### 2.1 钻孔平台方案设计需要重点考虑的问题

(1)桥区风大浪高,航运繁忙。桥位处每天船舶通行量达到4 000 艘,施工期间必须采取有效的保护措施确保钻孔平台以及船舶的安全。

(2)墩位区最大水深 32 m,最大流速 $>3.0$  m/s,如何解决深水、大流速下搭设钻孔平台过程中钻孔平台支撑桩的稳定性问题。

(3)桩位密集,桩间净距仅 3.6 m。

(4)单根钢护筒长 69.2 m,壁厚 25 cm,重量 125 t,入土深度 34 m,倾斜度 $<5\%$ ,需要考虑合理的方案确保钢护筒准确地沉设到位。

(5)在施工过程中,河床的冲刷对施工影响大。根据模拟河床冲刷的试验报告,若不采取河床防护,承台完成后最大冲刷深度达到 21.5 m,将严重影响施工期间临时结构安全,需根据钻孔平台方案进行河床防护设计。

### 2.2 初步方案设计

基于北主墩的具体工程特点,提出了 3 种可行性技术方案并进行了初步设计:

(1)先沉设钢管桩形成钻孔平台,后沉设钢护筒进行钻孔桩施工;

(2)直接沉设钢护筒形成钻孔平台,进行钻孔桩施工;

(3)浮运钢吊箱。

#### 2.2.1 钢管桩支撑钻孔平台方案

钻孔平台由上游平台区、钻孔平台区、下游平台区组成。采用高桩梁式结构,由支撑钢管桩( $\phi 1\ 400 \times 16$ )、上层主梁( $\square 1\ 200 \times 800$ )与次梁( $\square 800 \times 400$ )、下层钢管平联( $\phi 800 \times 12$ )构成。结构见图 2 所示。

需要注意的是, $\phi 1.4$  m 辅助桩与钢护筒之间的净距仅 1 m 左右,若采用更大直径的钢管桩,提高单桩刚度,不但与规范关于桩的间距的要求不符,而且辅助桩或钢护筒在施打过程中若发生相向的偏位和(或)倾斜,极有可能发生二者相碰造成桩或护筒变形,对平台安全构成威胁,同时给后续钻孔桩施工带来难以克服的困难。

#### 2.2.2 钢护筒支撑钻孔平台方案

该方案由起始平台区、钻孔区、下游平台区组成,起始平台位于钻孔平台上游侧,主要作用是为沉放钢护筒,安装悬臂式定位导向架(用于下沉钢护筒时定位导向),提供具有足够刚度的起始工作平台。在平台南北侧各设置 4 根靠船桩。平台结构见图 3。

起始平台及下游平台采用 $\phi 2\ 540 \times 20$  钢管桩支撑,桩顶标高 $+7.0$  m,桩底标高 $-48.0$  m。上部结构采用高、宽为 1 000 mm、600 mm 的钢箱梁通过牛腿与钢管桩焊接连接,标高 $+2.0$  m 处设置 $\phi 1\ 400 \times 14$  钢管作为下层平联。所有构件之间的连接均采用焊接方式。

护筒区平台利用 $\phi 2\ 850 \times 25$  永久钢护筒作为支撑结构,护筒顶标高 $+7.0$  m,单根钢护筒下沉到位后,标高 $+2.0$  m 处的 $\phi 1\ 200 \times 10$  的连接钢管及顶面处 2 $\square 700 \times 300$  的型钢与周围的钢护筒和钢管桩刚性连接起来,护筒区钢护筒自上游向下游侧逐排沉设,全部下沉到位后,即形成刚度强大的护筒区施工平台。

#### 2.2.3 浮运钢吊箱方案

浮运钢吊箱方案计算工况多,结构较为复杂,必须同时兼顾钻孔和承台施工。为保证钢吊箱的定位,在距离钢吊箱中心线南北侧 30 m 处各布置 2 个导向墩,兼做靠船墩。浮运钢吊箱与常规钢吊箱结构相似,结构见图 4 所示。

单个导向墩平面尺寸为 30 m $\times$ 8 m,由 12 根 $\phi 2\ 540 \times 20$  支撑钢管桩和 1 000 $\times$ 600 钢箱梁双层平联组成,钢管桩斜度为 4:1,桩顶标高为 $+6.0$  m,

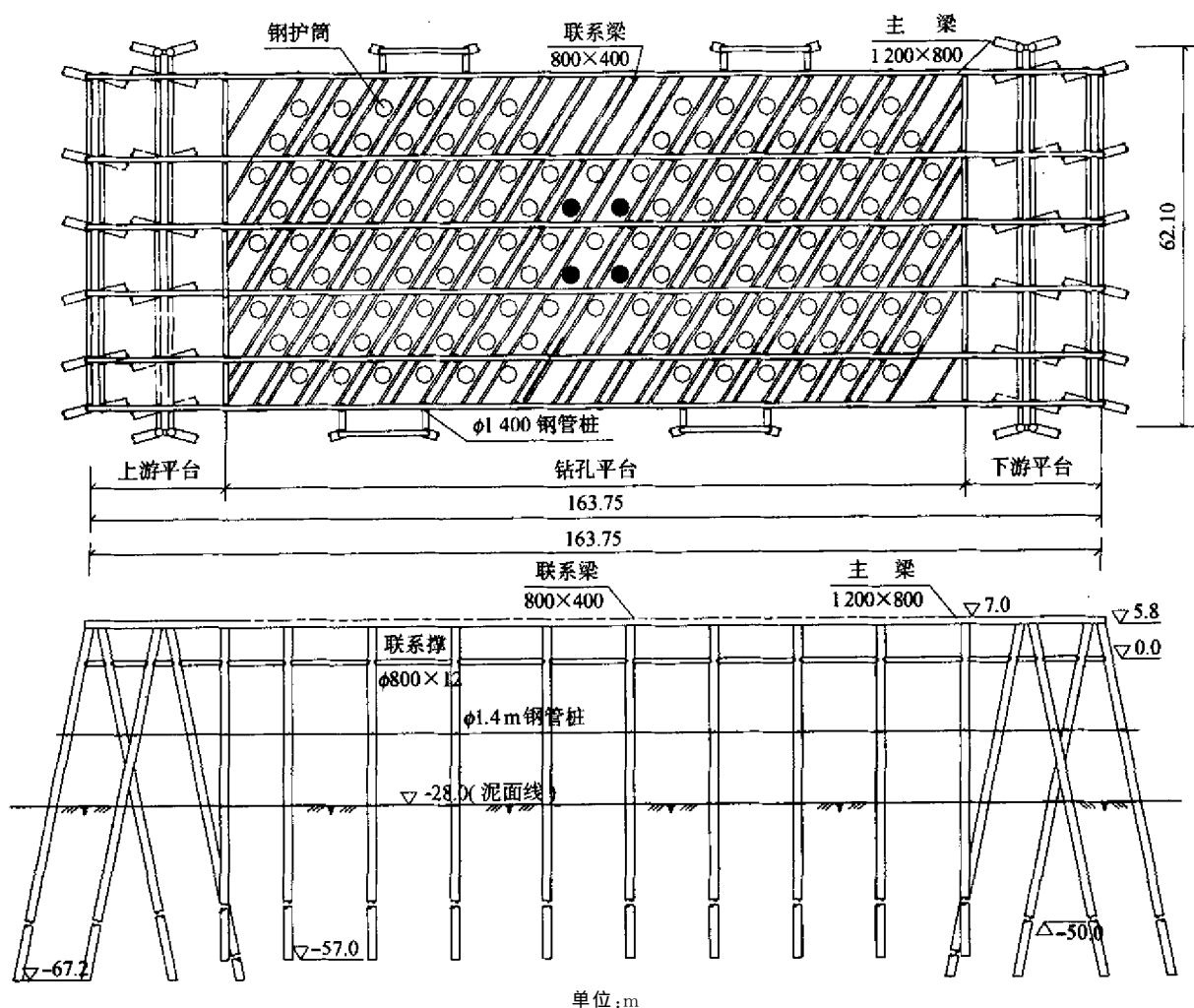


图 2 钢管桩钻孔平台结构

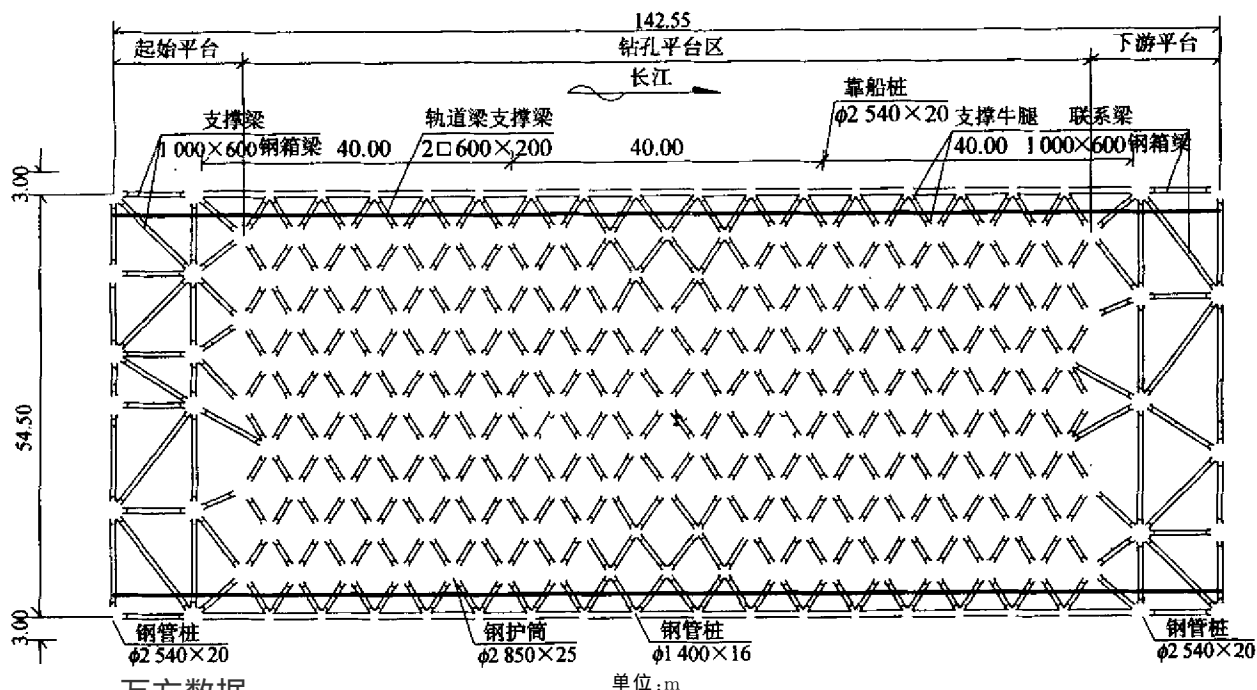
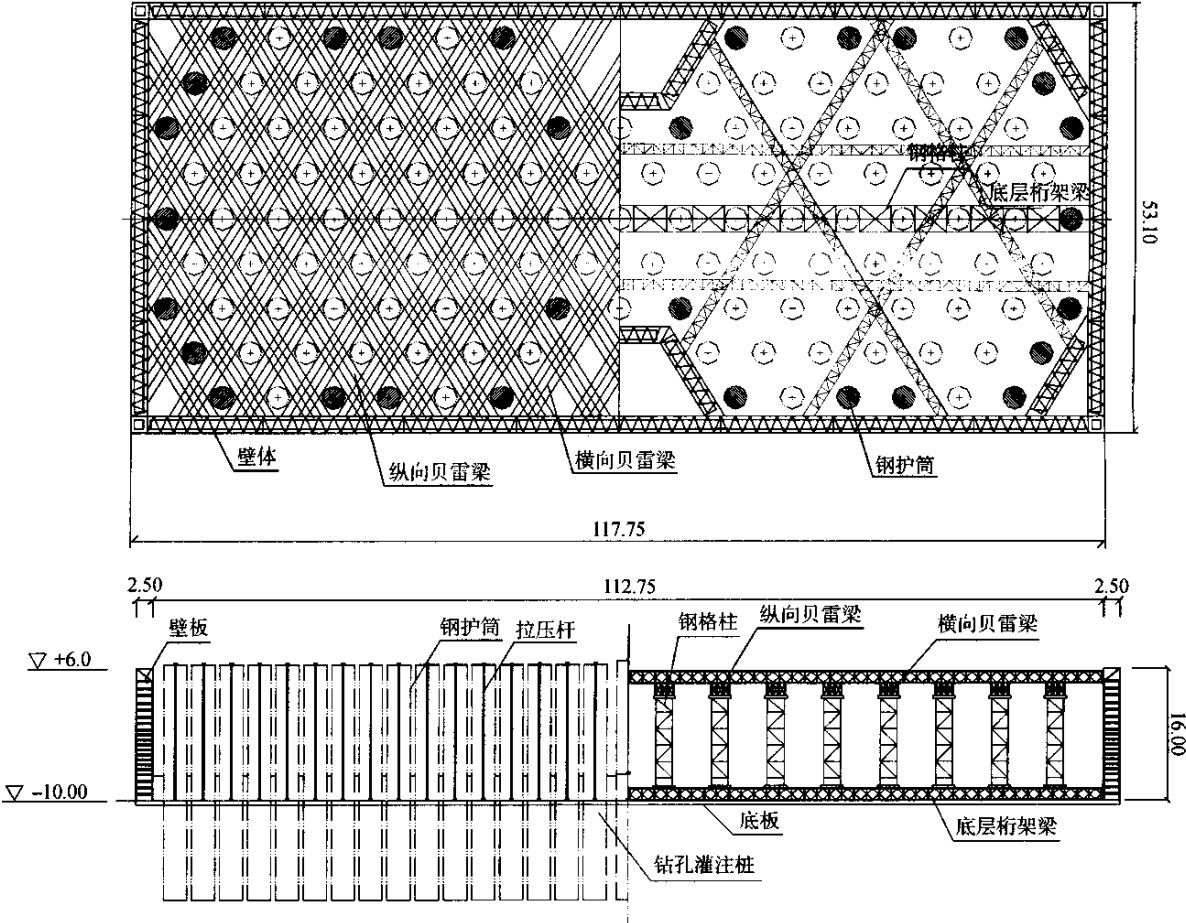


图 3 钢护筒钻孔平台平面结构



单位:m  
图 4 浮运钢吊箱结构

桩底标高为-50.0 m。

统。钢吊箱固定示意图 5 所示。

在工厂内完成钢吊箱制作后,拖至现场墩位处,利用导向墩上的牵引系统将钢吊箱牵引至 2 排导向墩间,及时安装上下游定位船、钢吊箱、导向墩的锚缆。在平潮位期间调整钢吊箱平面位置。首先沉设 30 根支撑钢护筒(红色部分),通过固定装置将钢吊箱结构受力转换至支撑钢护筒上,固定好钢吊箱。利用钢吊箱上的定位、导向装置,从周边向中间逐步完成钢护筒沉设。部分钻孔桩成桩后解除锚固定位系

3 方案比选

3 个钻孔平台方案均有可行性,采取合理措施、加强现场组织管理力度,都是可以用于北主墩基础施工。为使所采取的方案达到最优化,从工程材料的用量、施工工期、施工风险进行了综合比较,比较结果见表 1~表 4。

表 1 工程材料比较

项 目	钢管桩支撑钻孔平台	钢护筒支撑钻孔平台	浮运钢吊箱
钢管桩	5 080	3 700	3 536
平联用钢量	1 864	1 600	550
钢套(吊)箱	4 791	4 800	5 120
万寿数据	11 735	10 100	9 206

注:材料表中未计入钢护筒材料量。

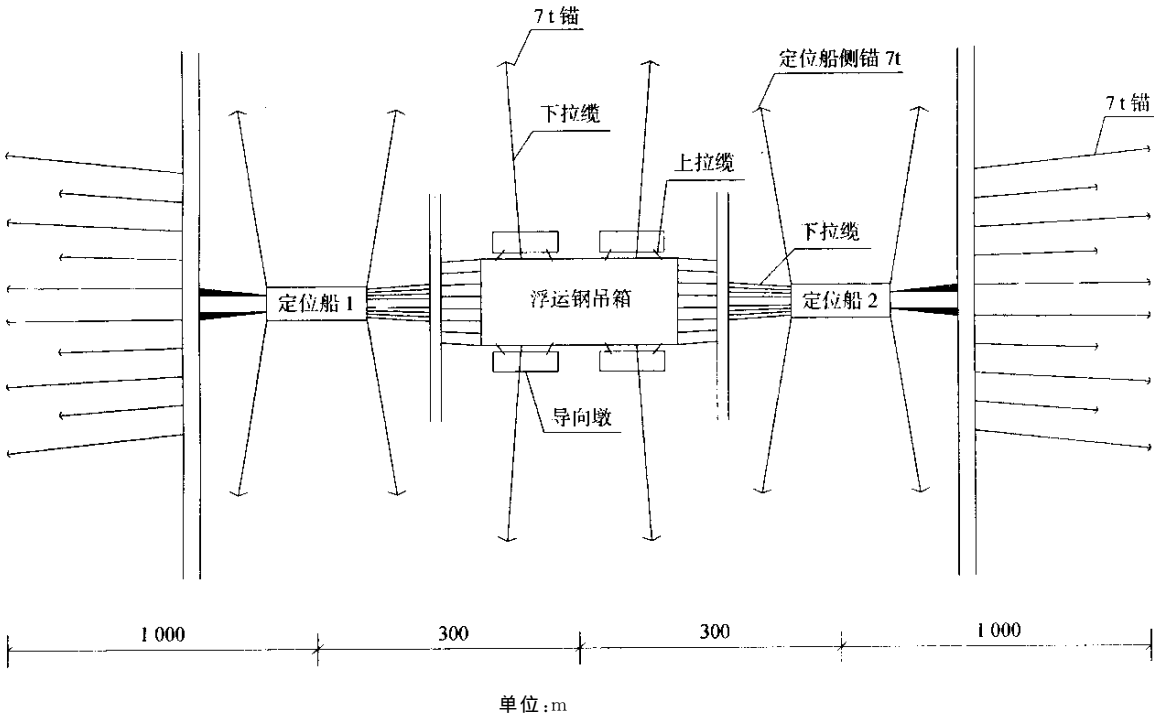


图 5 导向墩、定位船及锚固系统布置

表 2 施工工期比较 月

方案	钢管桩支撑钻孔平台	钢护筒支撑钻孔平台	浮运钢吊箱
工期	23	22	20

表 3 施工风险比较

项目		钢管桩支撑钻孔平台	钢护筒支撑钻孔平台	浮运钢吊箱
钢吊箱定位		—	—	在大流速、潮差影响明显、双向往复流、船形波的影响下,定位很困难
钢管桩下沉		采用的钢管桩刚度小,大流速下很难稳定,须采取临时措施	能够保证	能够保证
钢护筒下沉	下沉难度	下沉难度小,若遇到障碍物可边钻边沉	下沉难度较大,遇到障碍物需搭设临时平台进行孔内清理下沉	下沉难度小
	精度控制	易控制	较难控制	起始支撑钢护筒定位精度较难控制
施工期间平台的稳定		较难稳定,钢护筒下沉过程中产生的振动,易使砂层液化,造成钢管桩下沉,危及平台安全	稳定	起始稳定性较差
河床防护的影响		采用分阶段防护,对后续工程影响小	采用分阶段防护,后续工程影响小	分阶段防护困难,一次性防护造成钢护筒下沉困难
钢吊箱封底难度		较小	较小	钻孔过程中很难保证钻渣及泥浆不进入套箱内,封底时需要进行清理,难度较大

表 4 3 个方案综合比较

项目	钢管桩支撑钻孔平台	钢护筒支撑钻孔平台	浮运钢吊箱
经济性	差	较好	好
施工工期	长	较长	短
施工风险	较低	低	高

经综合考虑,北主墩钻孔桩施工采用钢护筒支撑钻孔平台方案。

4 生产性试验

为了确定或检验设计桩长、钻孔平台搭设、钻孔桩及承台施工工艺和设备、河床防护效果,检验各土层的承载能力,对比试验确认桩底后注浆效果,确定钻孔泥浆配比、钻头选型、钻进速度、钻压等工艺参数,在北主墩附近处进行了试桩试验。试桩平台结构与钻孔平台结构相似,支撑桩采用  $\phi 1\ 400\times 18$  钢管桩。

4.1 钢管桩沉设

试验平台支撑钢管桩沉设时,正值 7 月份,墩位区实测最大流速达 3 m/s,河床面冲刷至  $-30.0\text{ m}$ ,最大水深达 34.0 m。

经计算单桩在水流作用下产生涡激振动。为避免单桩的涡振,施工时采用“航工桩七”施打钢管桩,“航工桩四”作为稳桩船固定桩顶部,提高单桩稳定性。第 1 排 4 根桩沉设后,分别与“航工桩四”连接稳桩并横向连接成整体,第 2、第 3、第 4 排桩每施打 1 根后均与已联结桩形成整体后才脱离航工桩七龙口。钢管桩沉设示意图 6 所示。

4.2 试验结论

结合主 1 号墩(北过渡墩)试桩结果,得出以下结论:

- (1)在深水大流速条件下难以保证  $\phi 1\ 400$  钢管桩的单桩稳定,即使采用“桩四”稳桩措施,由于钢管桩直径较小,在如此恶劣水文条件下,单桩处于稳定临界状态,在主墩钻孔平台设计时必须重视单桩稳定计算,选择合适直径的钢管桩;
- (2)由于单桩稳定性较差,在水流作用下极易产生摆动,很难保证钢管桩间水平平联的焊接质量,且接头是结构应力最集中的部位,设计时应选择能保证现场安装质量的连接方式;
- (3)采用最大起重量为 300 t 全回转起重船,配合 2 台并联 APF-400 型振动锤施沉钢护筒的下沉方案可行;

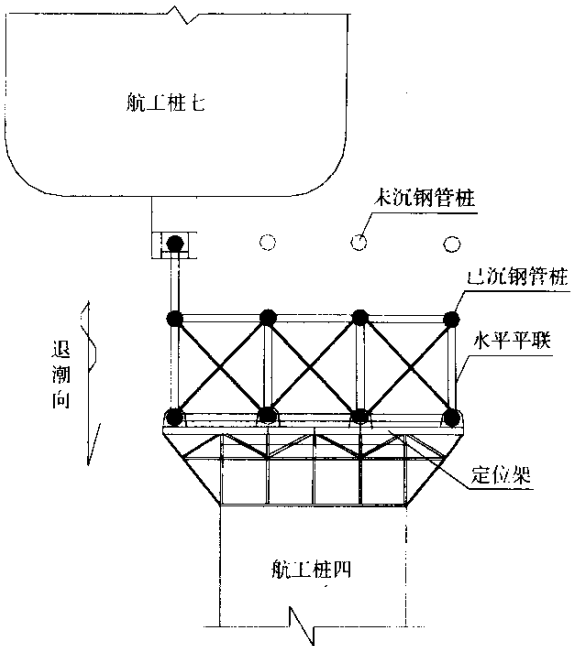


图 6 试桩平台搭设示意

(4)北主墩试桩区的河床防护是比较成功的,在水下形成了预期的防护区,可保证墩位处施工期的河床稳定。

5 北主墩执行方案设计

根据试桩结论,进行了钢护筒钻孔平台方案的技术设计,分为设计、施工两部分,其中设计部分包括了单桩稳定性验算、起始平台结构验算、钻孔平台结构验算、河床防护设计。

5.1 钻孔平台设计

钻孔平台结构同图 2,钢护筒与平联间连接采用抱箍型式,取代初步设计时考虑的直接焊接方式,较好地保证了现场连接质量。

5.1.1 设计条件

- (1)平台施工期水文条件。  
设计高潮位: 3.66 m;  
设计低潮位:  $-1.26\text{ m}$ ;  
设计水流流速:  $2.21\text{ m/s}$ ;  
钢护筒振动下沉时允许水流流速:  $1.5\text{ m/s}$ ;  
钢护筒下沉时设计风速: 不大于 7 级。
- (2)平台使用期水文条件。  
设计高潮位:  $4.3\text{ m}$ ;  
设计低潮位:  $-1.45\text{ m}$ ;  
设计水流流速:  $2.48\text{ m/s}$ ;  
校核水流流速:  $2.75\text{ m/s}$ ;

设计河底高程: -28.0 m;  
设计冲刷深度: 5.0 m;  
设计风速: 32.0 m/s。  
(3) 施工荷载主要考虑钢护筒下沉过程中的激震力、钻机重量以及平台上门吊重量等。

5.1.2 设计工况

- (1) 平台施工期计算工况。  
单桩稳定计算和起始平台上设置导向架沉放钢护筒时的结构验算。
- (2) 平台使用期计算工况。

起始平台及下游平台结构计算; 整个施工平台形成后的整体稳定性计算。

5.1.3 单桩稳定性验算

施工期起始平台采用  $\phi 2\ 540\times 20$  钢管桩, 护筒区平台采用  $\phi 2\ 850\times 25$  钢护筒。钢管桩和钢护筒沉放到位后, 受水流力和波浪力的影响, 计算 2 种支撑结构单桩起振流速、稳定, 计算结果见表 5。

表 5 单桩起振流速计算结果

桩规格	起振流速/(m/s)	
	横向	纵向
$\phi 2\ 540\times 20$	1.99	2.28
$\phi 2\ 850\times 25$	2.59	3.00

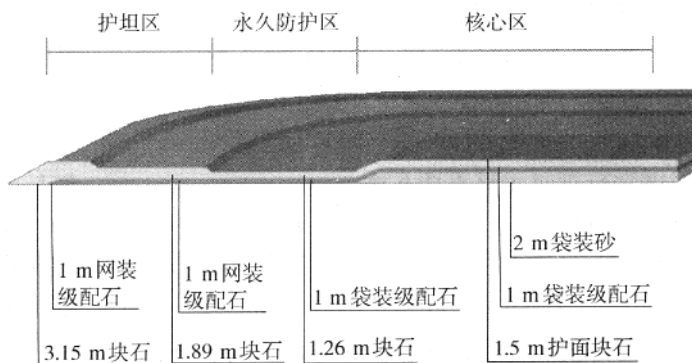
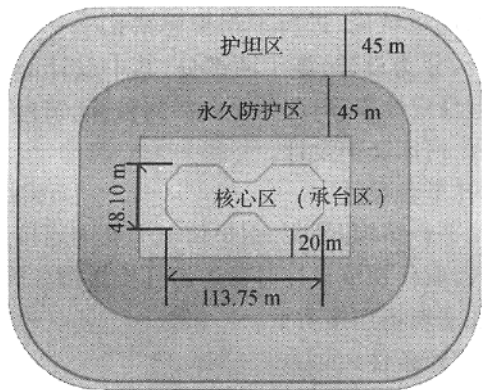


图 7 河床防护范围及防护结构组成

- 2 m 厚袋装砂施工;
- ② 在钻孔平台搭设完毕后, 先后进行核心区级配石、护面块石的抛填;
- ③ 当钢护筒下沉一半时, 进行上游永久性防护区和护坦区级配石施工;
- ④ 整个平台完成后, 分别抛填下游永久防护区和护坦区级配石、护面块石, 同时进行上游永久防护区和护坦区护面块石抛填。

单桩起振流速均大于最大平均涨落潮流速, 表明单桩稳定。钢护筒施沉时应避开最大潮流速。

5.1.4 起始平台结构验算

采用有限元法对平台结构进行计算。  
起始平台最大水平位移为 6.9 cm, 平台构件最大应力为 106 MPa。

5.1.5 钻孔平台整体验算

计算结果, 钻孔平台最大水平位移为 5.3 cm, 平台构件最大应力为 109 MPa。

5.1.6 河床防护设计

由于桥区河床表层为松散的粉细砂, 起动流速小, 极易形成冲刷。为保证施工期间钻孔平台的安全, 结合永久性防护, 分阶段进行护底防冲刷防护方案。

- (1) 河床防护范围及防护构造组成。

北主墩冲刷防护平面布置分为核心区、永久防护区和护坦区。根据伊兹巴什公式计算; 护底采用的 1 m<sup>3</sup> 袋装砂及袋装级配石、等效粒径 > 0.4 m 的块石, 起动流速均大于 3 m/s, 可保证基础施工中河床稳定。平面布置及防护构造组成见图 7 所示。

- (2) 防护阶段划分。

- ① 在钻孔平台搭设前, 采用开体驳进行核心区

5.2 钻孔平台施工

首先利用浮吊吊桩, 定位船上设置导向架完成起始平台的钢管支撑桩沉放和平台搭设; 利用锚固在起始平台上的悬臂式定位架导向沉放钢护筒, 并将已沉设到位的钢护筒与起始平台进行连接, 完成一排钢护筒沉放后, 钢护筒间及时进行连接; 导向架前移, 沉放下一排钢护筒, 直至完成所有钢护筒的沉放, 形成护筒区平台; 再利用已搭设的平台、悬臂式

定位导向架及浮吊完成下游平台桩的沉放,形成下游施工平台。

钢管桩及钢护筒沉设采用悬臂式定位导向架定位导向,300 t 起重船作为吊装设备,2 台 APE400 型振动锤并联振动下沉。

### 5.2.1 起始平台搭设

起始平台钢管桩施沉采用 2000 t 甲板驳船作为定位船,利用安装在定位船船艏的定位导向架定位,振动下沉,受水深水流条件、钢管桩设计长度、下沉定位方式等因素的制约,为提高作业效率和沉桩质量,单根 55 m 长的钢管桩整根沉放。

钢管桩着床选择在流速  $<1.5$  m/s 和风力  $<6$  级时进行,以确保沉设过程中的定位精确度和船舶稳定。在钢管桩水平联系施工的同时,为提高单桩的稳定性,向已沉钢管桩内充填砂。

### 5.2.2 钻孔平台搭设

$\phi 2\ 850$  mm 钢护筒从起始平台前沿第 1 排开始沉放,逐步从上游往下游推进。

#### (1) 钢护筒下沉。

钢护筒分 2 节下沉,下节长 59.2 m,上节长 10 m。

首先起重船将第 1 节钢护筒吊入定位导向架的导向装置内,锁定上下龙口,利用龙口的调节装置,调整钢护筒的平面位置及垂直度,使平面位置偏差  $\leq \pm 30$  mm,倾斜度  $\leq 2/1\ 000$ 。起重船落钩,钢护筒沿导向架着床并入土,起重船脱钩。起重船吊安振动锤至钢护筒顶口,校正钢护筒及振动锤的位置,起振动锤,护筒下沉。当振动锤至上导向装置 1.0 m 时停止振动,移走上层导向龙口,继续振动下沉护筒至下层导向龙口顶面约 1.5 m 处,停止振动下沉。将振动锤吊开,用起重船吊装对接第 2 节护筒。护筒对接完成且上层导向精确就位后,安装振动锤下沉护筒至设计标高。护筒下沉后的平面偏位  $\leq 50$  mm,倾斜度  $\leq 5\%$ 。护筒下沉到位后,及时与起始平台及相邻钢护筒进行连接。在钢护筒周围补抛砂袋。

#### (2) 钻孔平台形成。

钢护筒之间用钢管、型钢在标高  $+2.0$  m 和  $+7.0$  m 处设置 2 层水平联系。单根护筒沉放结束后,按设计要求焊接平联,与已沉护筒连成整体,防止单根护筒在潮流作用下发生偏位。

## 6 结语

在苏通大桥北主墩基础钻孔平台方案设计中,集合了国内外在河床防护及结构设计方面最具实力的设计、研究、施工单位,结合专家的智慧,对深水大流速、复杂地质条件下钻孔平台施工技术难题进行了研讨,形成了技术可靠的施工方案。

(1) 钻孔平台结构初步设计中考虑了钢管桩支撑钻孔平台、钢护筒支撑钻孔平台、浮运钢吊箱等 3 种可行性技术方案,通过对经济性、施工工期、施工风险等方面的比较,考虑本工程钢护筒作为结构受力的一部分,其直径大、壁厚、埋置深的特点,选择了经济性较好、施工风险低的钢护筒支撑钻孔平台方案,采用悬臂式定位导向架配合大型振动锤沉放钢护筒的施工方案,解决了单桩及施工平台的稳定问题,同时保证了钢护筒倾斜度 5% 的精度要求。为在深水、大流速条件下,进行钻孔平台搭设施工提供了一个可供选择的方案,丰富了大型桥梁基础的施工经验。

(2) 为减少现场焊接工作量,保证钢护筒与钢管桩之间、钢护筒间连接的强度,对哈佛形式、加劲板形式、牛腿形式和抱箍形式进行了比较,最终选定了质量容易保障的抱箍连接。

(3) 结合河工模拟实验,采用分阶段河床防护方案,保证钻孔平台在施工阶段及使用阶段河床的稳定。

(4) 钻孔平台搭设与河床防护交替进行,缩短了施工工期;采用大刚度悬臂式定位导向架沉设钢护筒,保证了钢护筒的沉设精度。

## 巫山长江大桥竣工通车

2005 年 1 月 8 日,重庆市巫山长江大桥竣工通车。

巫山长江大桥位于长江三峡巫峡口,全长 612.2 m,主拱净跨 460 m,桥宽 19 m。其缆索吊装系统路径、吊重量、起吊高度、泵送混凝土难度均为同类桥之最。大桥建设工程于 2001 年 12 月 28 日开工建设,总投资 1.96 亿元。

该桥的建成通车,可连接湖北巴东、恩施、宜昌、建始以及湖南的张家界等,对拓展巫山旅游发展空间,顺畅渝东交通,促进渝东经济发展有着深远的意义。