

文章编号: 0451-0712(2005)06-0018-04

中图分类号: U445.556

文献标识码: B

安庆长江公路大桥 北索塔基础钢围堰稳定施工技术

欧阳钢

(湖南路桥建设集团公司 长沙市 410004)

摘 要: 介绍了安庆长江公路大桥北塔墩钢围堰在漂浮状态时的稳定施工, 以及由于墩位地质地貌复杂, 基础钢围堰刃脚在不足 $1/3$ 刃脚长度着岩的情况下, 钢围堰在封底前和钢围堰在渡洪状态时的稳定施工技术。

关键词: 安庆长江公路大桥; 钢围堰; 稳定; 施工技术

1 工程概况

1.1 北塔基础形式

安庆长江公路大桥主桥为 $265\text{ m} + 510\text{ m} + 265\text{ m}$ 双塔双索面钢箱梁斜拉桥, 索塔深水基础采用双壁钢围堰钻孔桩复合基础。桩基设计为 18 根桩径为 3 m 的钻孔灌注桩, 呈梅花形布置, 按摩擦支承桩桩受力考虑, 桩基标高由 $-93.00\text{ m} \sim -9.00\text{ m}$, C30 混凝土。钢围堰为双壁自浮式结构, 外径为 32 m , 内径 29 m , 壁厚 1.5 m , 高 47.4 m 分为 10 节, 壁内设计考虑浇注 C20 井壁混凝土至标高 -2.77 m , 钢围堰结构自重 $1\,309\text{ t}$ 。用 C20 混凝土封底, 设计厚度为 7 m 。

1.2 地质条件

北塔墩位江底河床面高程为 $-19.8\text{ m} \sim -21.3\text{ m}$, 覆盖层厚为 $11.4\text{ m} \sim 13.8\text{ m}$, 上部为细砂、砂砾石层, 下部为砂卵石层, 卵石层厚 $2\text{ m} \sim 3\text{ m}$, 卵石粒径一般为 $5\text{ cm} \sim 8\text{ cm}$, 最大 12 cm 。钢围堰刃脚下基岩层最高标高为 -32.0 m , 最低标高为 -35.25 m , 北上游向刃脚处的岩面与南下游向刃脚处的岩面高差为 3.25 m , 基岩斜面上覆盖层为砂砾石。钢围堰着岩岩层容许承载力为 0.6 MPa , 极限摩阻力为 0.12 MPa 。

1.3 水文条件

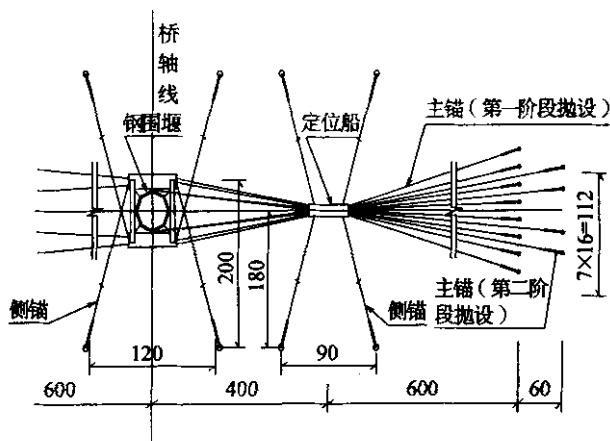
1~4 月江面水位为 $4.30\text{ m} \sim 8.80\text{ m}$, 6~7 月为 $12.19\text{ m} \sim 13.05\text{ m}$, 8~12 月为 $12.47\text{ m} \sim 16.42\text{ m}$ 。中水期桥位处水流速度为 $0.91\text{ m/s} \sim 1.31\text{ m/s}$ 。水流流向与桥轴线法向的夹角在左 $4^\circ \sim 7.8^\circ$ 之间; 洪水期桥

位处水流速度为 $1.83\text{ m/s} \sim 2.33\text{ m/s}$, 水流流向与桥轴线法向的夹角在 $0^\circ \sim$ 左 7.5° 之间。

2 北塔基础钢围堰稳定施工技术

2.1 钢围堰在漂浮状态时的稳定施工技术

锚锭系统包括由驳船和联结梁(万能杆件拼装而成)组成的导向船、定位导向架、钢围堰、定位船、拉缆、主锚、侧锚、尾锚等(所有锚体均采用霍尔铁锚)。根据计算, 主锚抛设分为两个阶段进行, 即第一阶段抛设 8 个主锚, 保证钢围堰直至着岩阶段的施工安全; 第二阶段视汛期洪水情况再抛 4 个主锚, 锚锭系统布置见图 1 所示。



单位: cm

图 1 锚锭系统布置

锚锭系统布设顺序为:定位船自锚→主锚抛设→定位船侧锚抛设→导向船、钢围堰浮运就位→上拉缆安装→导向船侧锚抛设→导向船尾锚抛设→下拉缆挂设→主尾锚对拉试验→导向船定位。

2.2 钢围堰在封底前部分刃脚着岩状态时的稳定施工技术

2.2.1 钢围堰状况

钢围堰刃脚下基岩面最高标高为 -32.0 m ,最低标高为 -35.25 m ,北上游向刃脚处的岩面与南下游向刃脚处的岩面高差为 3.25 m ,基岩斜面上覆盖层为砂砾石。此时钢围堰的拼装已全部完成,处在倾斜基岩面上的钢围堰仅有岸侧约 $1/3$ 刃脚着岩,其余大部分刃脚则支承在卵石层中;钢围堰刃脚段平均高程为 -32.355 m ,堰顶平均高程为 $+15.045\text{ m}$ 。钢围堰外周边河床覆盖层厚度最小为 4.2 m ,最大为 10.4 m ,平均为 6.8 m 。钢围堰顶面偏南 5.6 cm ,偏上游 29 cm ;刃脚面偏南 7.1 cm ,偏上游 6.5 cm ,其倾斜度南北向为 0.3% ,上下游向为 4.7% 。钢围堰的位置精度满足设计要求。

围堰总高为 47.4 m ,钢材总重为 $1\,309\text{ t}$ 。钢围堰填壁混凝土已浇注 $3\,000\text{ m}^3$,重量约为 $7\,500\text{ t}$ 。钢围堰舱壁内灌水总重约 $1\,966\text{ t}$ 。钢围堰系统目前总重约为 $10\,865\text{ t}$,扣除水浮力重量为 $5\,582\text{ t}$ 。

2.2.2 稳定性分析

钢围堰下沉至约 -32.3 m 标高后,仅在北侧刃脚着岩范围进行吹砂施工。在 10 多天时间内,尽管进行了钢围堰拼接、隔舱内灌水、堰内中心及中心以北半边范围的吹砂清基施工,使围堰增加重量约 400 t ,围堰北半边刃脚斜板下覆盖层已被清空,但钢围堰的位置、倾斜度并没有发生变化。同时,堰外围堰周边河床覆盖层冲刷状况也几乎没有变化。

北塔基础设计的考虑是,在汛期前完成钢围堰封底和成基桩 4 根,此后在洪峰来临前尽可能多成桩,使封底混凝土有可靠支承,则钢围堰渡洪万无一失。即使钢围堰下岩层被冲空,钢围堰系统自重也可由基桩承受。

但未封底前,由于上游、北侧围堰刃脚已着岩,未着岩部分的卵石层也不厚,下游是回水淤积区,冲刷情况不严重,所以钢围堰的安全隐患在于钢围堰南侧刃脚卵石层被冲空,出现钢围堰倾斜情况。

2.2.3 稳定措施

如图2所示,为防钢围堰南侧刃脚被冲空下沉倾斜,从钢围堰南侧伸出一定数量的抗倾钢管桩穿

过卵石层并进入岩层代替钢围堰刃脚着岩是较好的方法。由于钢围堰有一部分着岩,有一部分不考虑被冲空,故抗倾钢管桩最多需承受钢围堰一半的自重,且因为围堰自身的强大刚度,各抗倾钢管桩几乎可认为均匀承担受力,由此可确定抗倾钢管桩数量。由于钢围堰露出水面有足够高度,因此抗倾钢管桩与钢围堰采用焊连方式也有足够高度。为保证钢围堰体系的安全稳定,现未浇完的隔舱混凝土留待较多基桩完成后,钢围堰系统已完全稳定后再浇注完成。在堰内南侧堰壁处布置 6 根抗倾钢管桩,其规格为 $\phi 120\times 8$,长度为 52.5 m ,用 160 t 振动锤将其打入岩层 $4\sim 5\text{ m}$ 。在封底前,在抗倾钢管桩内填充混凝土至钢围堰封底混凝土面,有 $7.5\sim 9.5\text{ m}$ 高度。

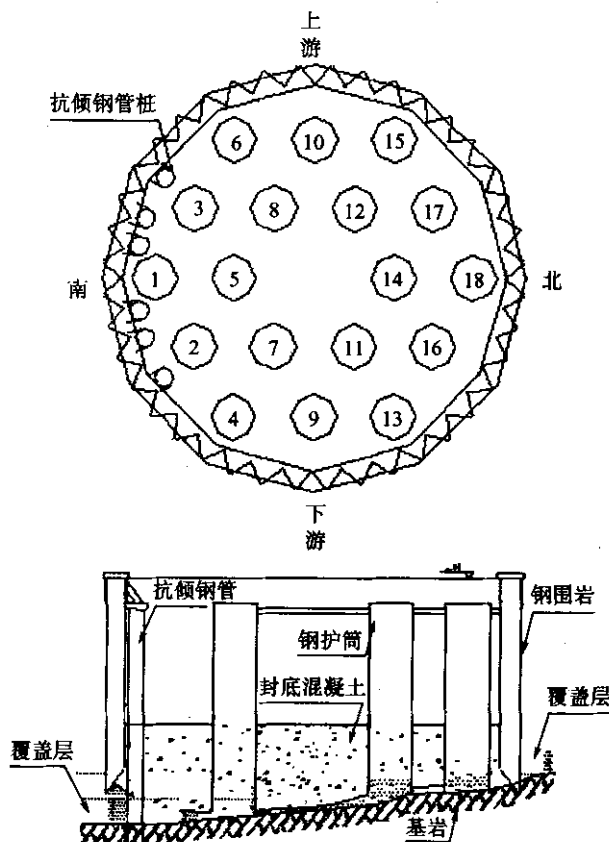


图2 钢围堰防倾

2.2.4 稳定措施受力计算

(1) 不设抗倾钢管桩钢围堰的受力状况

假定围堰外覆盖层未被冲空,则钢围堰刃脚下卵石层也不会被淘空。按卵石层的支承及 3 m 覆盖层摩阻力考虑,其支承整体钢围堰的能力为:

$$P = \pi(R^2 - r^2) \cdot [\sigma] + \pi D \cdot h \cdot [\tau] = 7\,327.8\text{ t}$$

式中: R 为钢围堰外径; r 为钢围堰内径; D 为钢围堰直径; h 为钢围堰外覆盖层厚度; $[\sigma]$ 为钢围

堰底地基支承应力; $[\tau]$ 为钢围堰外覆盖层摩阻力。

$$P = 7\,327.8 \text{ t} > \text{钢围堰体系重量} = 5\,582 \text{ t}.$$

由计算可知:在上述假定情况下,如果围堰覆盖层未被冲空,钢围堰的安全是有保障的。

(2) 抗倾钢管桩的支承能力

① 抗倾钢管桩位置土层的支承能力

$$P_1 = \pi \cdot D \cdot h_1 \cdot [\tau_1] + \pi \cdot D \cdot h_2 \cdot [\tau_2] + \pi R^2 \cdot [\sigma] \\ = 493.9 \text{ t}$$

式中: D 为抗倾钢管桩直径; h_1 为抗倾钢管桩外覆盖层厚度; $[\tau_1]$ 为抗倾钢管桩外覆盖层摩阻力; $[\tau_2]$ 为抗倾钢管桩打入岩层摩阻力; R 为抗倾钢管桩半径; h_2 为抗倾钢管桩打入岩层深度; $[\sigma]$ 为抗倾钢管桩底地基支承应力。

② 抗倾钢管桩自身的承载能力

截面承载能力:

$$P_2 = \pi(R^2 - r^2) \cdot [\sigma] \times 1.3 = 525.8 \text{ t}$$

式中: R 为抗倾钢管桩外径; r 为抗倾钢管桩内径; $[\sigma]$ 为抗倾钢管桩材质设计允许应力。

失稳临界力计算:

$$I = 0.0491 \cdot (D_1^4 - d_1^4) = 532\,242 \text{ cm}^4$$

临界力:

$$N_{cr} = \pi^2 EI / (\mu L)^2 = 714.71 \text{ t}$$

式中: D_1 为抗倾钢管桩外径; d_1 为抗倾钢管桩内径; E 为抗倾钢管桩材质弹性模量; I 为抗倾钢管桩惯性矩; L 为抗倾钢管桩长度; μ 为抗倾钢管桩长度系数。

综合以上计算,抗倾钢管桩的支承能力取 $P = 493.9 \text{ t}$, 于是 6 根抗倾钢管桩能够承受 $6 \times 493.9 \text{ t} = 2\,963.4 \text{ t} > 5\,582/2 = 2\,791 \text{ t}$, 故 6 根抗倾钢管桩有能力承受钢围堰一半重量。

为保证封底混凝土质量,钢围堰堰内仍按要求清基形成锅底形状(河床标高由围堰内壁处标高 $-30.05 \sim -32.85 \text{ m}$, 向围堰中心标高 -34.45 m 逐步递减), 但要注意控制不扰动钢围堰南侧刃脚处卵石层, 以使钢围堰处于安全状态。

钢围堰体系当时自重为 $10\,865 \text{ t}$, 扣除水浮力重量为 $5\,582 \text{ t}$ 。由于围堰隔舱内已灌水 $1\,966 \text{ t}$ 。在钢围堰封底、成桩达到足够安全状况前, 所施加的平台和钻孔设施重量, 将通过等重放水抵消而保持钢围堰重量的稳定, 从而增加钢围堰稳定的安全系数。

2.3 钢围堰在渡洪状态时的稳定技术

2002 年 3 月 22 日, 完成了围堰封底混凝土浇注, 共浇注混凝土 $4\,533 \text{ m}^3$ 。2004 年 4 月 18 日 ~ 4 月

22 日分别完成了 16 号和 17 号桩基。

因为墩位岩面倾斜, 局部基岩面高差大, 加之工程墩位变化而没有补充钻探, 所有地质资料都是根据墩位变化前的地质资料采取内插外延而得到的, 故桩基钢护筒在振打施工时, 并不能肯定刃脚全部着岩, 事实上 1~6 号钢护筒仍有一部分悬在基岩面之上而处在卵石层中, 其他钢护筒均大部分或完全嵌岩; 加之江侧围堰和部分封底混凝土又恰恰支承在不稳定的卵石层上, 如果汛期在没有采取其他相应必要措施的情况下, 洪水将不稳定的砂砾石冲刷掉, 很有可能会造成钢围堰的整体倾斜。

2.3.1 钢围堰渡洪短桩施工

为确保钢围堰系统安全, 在汛期洪峰来临前, 必须完成墩位江侧 1~6 号桩基中的 2~3 根桩基础的成桩, 较为有利的是 1、4、6 号桩。但 1~6 号桩在钻孔施工过程, 都出现了因护筒外砂砾石受到扰动及土侧压力作用而向孔内坍塌, 钻机无法钻进, 为此试用了压浆固结砂砾石层稳定的方法和泥浆护壁的方法钻孔, 但都没有取得成功, 最后采用保险的内护筒方法才得以顺利钻进。当时是 5 月初, 长江常规汛期要到 6 月中旬, 按照计划汛期洪峰来临前, 完成墩位江侧 1~6 号桩中的 2~3 根桩的成桩应该是没问题的, 这样钢围堰至少有 4 根桩渡洪, 安全可靠, 但当年洪水在 5 月初就早早来到, 而且江侧围堰和部分封底混凝土下的砂砾石有冲刷的趋势, 当机立断将 1 号、4 号桩施工成短桩(浇注 C30 素混凝土, 待汛期过后钻除短桩混凝土重新按设计长度浇注 1 号、4 号桩), 桩底进入基岩 5 m (-41.0 m 标高), 桩顶与封底混凝土顶面平齐 (-23.0 m 标高)。这样在汛期来临时, 北塔钢围堰至少有 4 根桩支承围堰体系和抵抗洪水的水平冲击渡洪, 使钢围堰更加稳定、安全。

2.3.2 钢围堰渡洪受力分析

(1) 封底混凝土受力分析

随着洪峰的出现, 加剧了覆盖层的冲刷, 封底混凝土结构因冲刷而存在悬空问题, 考虑悬空部分的重量由钢护筒和桩基支承, 为了弄清封底混凝土结构悬空状态和在堰内抽水前浇注围堰填芯混凝土时, 是否造成封底混凝土安全储备不足或遭受破坏, 影响后期施工, 因此进行了封底混凝土由钢护筒和桩基支承状态时的受力分析。

将封底混凝土简化为连续梁, 假设工况条件为: 封底混凝土以下的覆盖层全部被淘空, 封底混凝土除了在水浮力、护筒外壁和围堰内壁的支撑作用外,

其余部位都处于悬空状态。从围堰内壁距刃脚 2.65 m 处开始,沿围堰内壁共设置 3 道宽为 10 cm,厚 8 mm 的剪力键,沿围堰内壁环绕 3 周,3 道剪力键之间竖向间距为 87 cm。护筒外壁每竖向间隔 1.8 m 设置 1 道环向劲板,板厚为 12 mm,宽为 10 cm。故将封底混凝土简化为连续梁受力应为合理模式(混凝土自重 $r=2.40 \text{ t/m}^3$,水浮力 $f=1.0 \text{ t/m}^3$)。

$$\sigma = \frac{M \times y}{\frac{1}{12 \times b \times h^3}} = 324.3 \text{ kPa}$$

式中: M 为封底混凝土简化为连续梁所受弯矩; y 为封底混凝土简化为连续梁的受力点到中性轴的距离; b 为封底混凝土简化为连续梁的高度; h 为封底混凝土简化为连续梁的宽度。

$\sigma=0.32 \text{ MPa}$, $R_1=1.55 \text{ MPa}$, $K=1.55/0.32=4.8$,由计算结果可知,悬空状态封底混凝土不会破坏。

(2) 桩基承载力受力分析

由于 16 号、17 号桩已完成施工,加之钢围堰及 7 m 厚的封底混凝土具有强大的自身刚度,1 号、4 号短桩可以认为与 16 号、17 号桩均匀承担荷载。且 1 号、4 号短桩合计承担封底混凝土的重量扣除水的浮力后的重量的一半。则每根短桩承担的荷载为: $6346 \text{ t}/4=1587 \text{ t}$ 。

根据地质资料可知,北塔墩在标高为 -39 m 的位置是微风化~新鲜基岩,而且天然单轴极限抗压强度有 20 MPa,1 号、4 号抗洪短桩桩底标高为 -41 m,此时抗洪短桩承载力为 7 000 t,远大于每根短桩需承担封底混凝土的荷载(1 587 t)。

(3) 围堰整体竖向稳定性分析

围堰内壁与封底混凝土之间的摩阻力和剪力键的支撑力计算,考虑粗糙混凝土与钢板间的材料摩阻力系数近似地取 0.3,围堰所受水压力最小取(水位标高取 +10 m,封底混凝土顶面为 -23 m) $F=r \cdot g \cdot h=3.3 \times 10^5 \text{ N/m}$ (r 为水的容重, g 为重力加速度, h 为水深),所以摩阻力 $f=[\tau] \cdot A \cdot F=6310 \text{ t}$ ($[\tau]$ 为粗糙混凝土与钢板间的材料摩阻力系数, A 为围堰壁与封底混凝土接触面积, F 为围堰所受水压力)。

钢围堰内壁与封底混凝土接触面处也设有规格为 L70×70×6 的角钢剪力键,竖向间距为 200 mm。剪力键的作用在于局部增强抗剪作用。围堰系统恒

载(扣除水浮力) $G=14776 \text{ t}$,围堰系统所受支承力总和为(4 根桩基础支承力,6 根抗倾钢管桩支承力,围堰着岩部分支承力): $7000 \times 4 + 6 \times 493.9 + 2791 = 33754.4 \text{ t}$ 。

安全系数: $K=33754.4/14776=2.28$,竖向受力安全。

(4) 围堰整体倾覆稳定性分析

流水阻力: $F=KArv^2/2g=360 \text{ t}$ 。

式中: K 为围堰形状系数, $K=0.8$; A 为围堰阻水面积; r 为水的容重; v 为水的流速; g 为重力加速度。

不考虑风力的影响,围堰封底混凝土以下的砂卵石覆盖层基本上被淘空。因此钢围堰整体结构的倾覆稳定性 $K=\frac{14.5G_{\text{total}}}{24.5F}=24 > > 1$ 。

式中: G_{total} 为围堰系统恒载,扣除水浮力为 14 776 t; F 为流水阻力。

由此可见,围堰整体倾覆稳定性满足要求。

3 结语

安庆长江大桥北塔墩墩位,由于地质地貌复杂,基础钢围堰刃脚在不足 1/3 刃脚长度着岩的情况下,通过结构受力分析,在围堰着岩部位的对侧围堰增打 6 根抗倾钢管桩来确保围堰封底前稳定;通过 2 根基桩和 2 根渡洪短桩确保封底混凝土受长江水流冲刷掏空堰底覆盖层后不被破坏,保证了北塔后续承台和下塔柱的顺利施工。

实践证明,大型桥梁深水基础钢围堰从 20 世纪 90 年代初的要求嵌岩到 90 年代末的着岩即可;从由于墩位岩面高差大设计为异形刃脚到安庆长江大桥的只要部分刃脚着岩(同时采取适当的稳定措施)和南京长江三桥全浮式套箱围堰施工平台,桥梁建设者们在实践过程中不断地总结和分析,根据桥梁墩位的不同水文地质地貌情况设计了不同的钢围堰,同时选择合适的施工时间,为桥梁建设降低了施工难度,加快了施工进度,减少了建设成本。

参考文献:

- [1] GB50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- [2] 陈明宪. 斜拉桥建造技术[M]. 北京: 人民交通出版社.