

锁口吊箱围堰在 Padma 大桥施工的应用

熊仕坤

(中铁大桥局集团第四工程有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要:孟加拉国 Padma 大桥主桥水中主墩采用超长大直径倾斜钢管桩基础、高桩承台结构。研究设计锁口单壁钢吊箱围堰作为桩内处理及承台施工的挡水结构。围堰平面为圆形布置,由底板、侧板、空间桁架式吊架及吊杆等组成,底板和侧板间、吊架与底板、侧板间均采用 $\phi 32$ mm 精轧螺纹钢筋连接,侧板间采用锁口连接。除底板及封底混凝土范围吊杆外,其余构件均可倒用。围堰分块制作,拼装成整体后利用浮吊整体吊装。锁口吊箱围堰在 Padma 大桥得到了成功应用,可为类似工程提供借鉴。

关键词:单壁;钢吊箱围堰;锁口;设计;施工;整体吊装

1 项目概况

孟加拉国 Padma 大桥为双层桥面布置,下层为单线铁路,上层为双向四车道公路。位于首都达卡市偏西南约 40 km 处,横跨 Padma 河(恒河),距印度洋入海口直线距离约 150 km,是连接 Mawa 与 Janjira 的主要交通要道,是连接中国及“泛亚铁路”的重要通道之一,也是中国“一带一路”倡议的重要交通支点工程。

Padma 大桥主桥全长 6.15 km,共 40 个水中主

墩,每个水中主墩基础为 6 根 $\phi 3.0$ m 的倾斜钢管桩,壁厚 60 mm,钢桩沿圆周均匀分布,斜度 1:6。桩顶高程 +1.75 m,桩底 5 m 范围内为土塞,需通过压浆密实;土塞上部 10 m 范围内填充水下混凝土;混凝土上部填充密实度大于 95% 的砂至距桩顶 15 m 处;桩顶 15 m 范围内填充混凝土,内埋与承台连接的钢筋笼;承台为现浇 C40 钢筋混凝土结构,正六边形,底面边长 9.33 m,顶面边长 8.412 m,底高程 +1.0 m,顶高程 +6.5 m,高 5.5 m,顶面设 1:10 流水坡,承台分两层浇筑,第 1 层为 1.5 m,第 2 层为剩余部分混凝土。基础布置如图 1 所示。

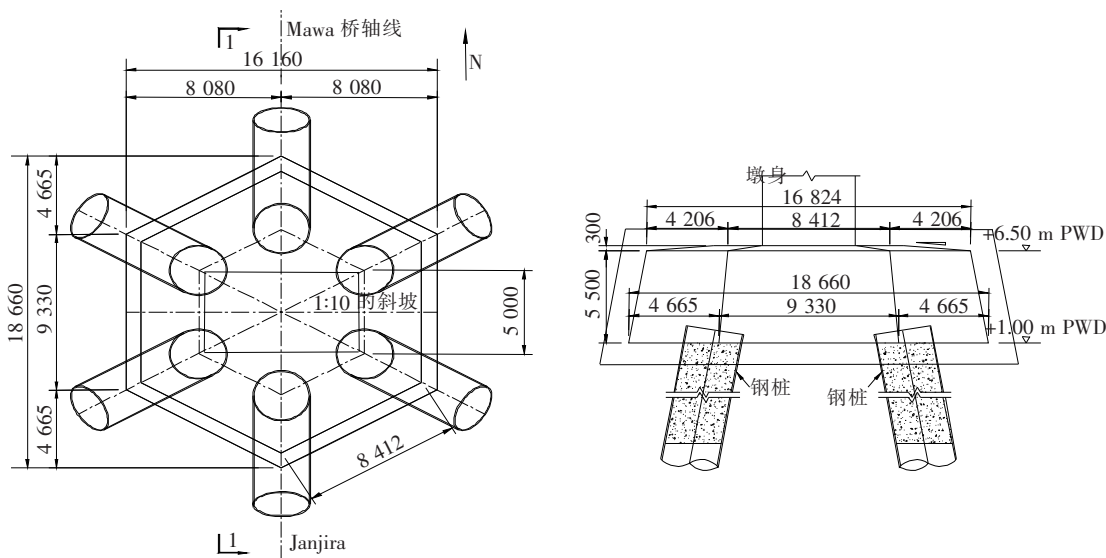


图 1 Padma 大桥主桥水中墩基础布置(单位:除标高为 m 外,其余:cm)

桥位处河面宽约 6.15 km,最大水深 27 m,平均水位+3.41 m,最大流速 4.6 m/s。地处恒河流域冲积区,水下暗砂较多,局部流向紊乱,较有代表性的地层为含少量云母的密实粉细砂地质。河床冲刷变化大,最大冲刷深度 50.4 m。

2 围堰设计

斜桩桩内处理及承台施工的围水结构采用锁口式钢吊箱围堰。围堰为内径 19.1 m、高 7.702 m 的圆形结构,由底板、侧板、吊架及吊杆等组成。

吊箱围堰立面布置如图 2 所示。

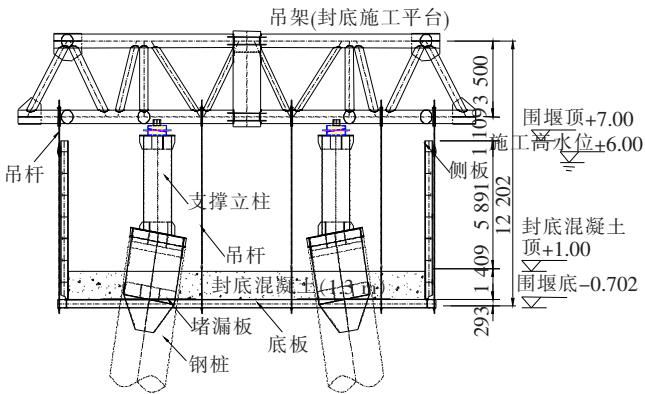


图2 主墩吊箱围堰立面布置(单位:除标高为 m 外,其余:cm)

2.1 计算工况

- (1) 封底工况:对围堰底板、吊杆、吊架等进行计算(流速 2 m/s,水位+4.0 m)。
- (2) 抽水工况:对围堰侧板、封底混凝土等进行计算(流速 4 m/s,水位+6.0 m)。
- (3) 浇筑(1.5 m)承台工况:对封底混凝土等进行计算(流速 2 m/s,水位+1.3 m)。

2.2 围堰结构

围堰通过吊架悬挂于斜桩接高立柱上,接高立柱由接桩结构、钢管柱、调整楔块及垫块等构成,底板及侧板采用型钢及钢板制作,吊架为 $\phi 1\,500\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 、 $\phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 、 $\phi 450\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ 及 $\phi 325\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 钢管焊接成空间桁架结构。底板与吊架、侧板与吊架之间采用 $\phi 32\text{ mm}$ 精轧螺纹吊杆连接。除吊杆材质为 JL930、底板结构材质为 Q235B 外,围堰其余结构材质均为 Q345B。

底板和侧板间的连接处在组装时垫 10 mm 厚胶皮。侧板平面分 6 块,各块之间采用锁口连接,便于安装和拆卸。锁口钢管间隙内抹黄油,锁口钢管靠围堰

内侧的小腔室采用拌制好的软黏土条填充,并用钢筋捣实,起接缝堵水作用。侧板之间锁口构造见图 3。



图3 吊箱围堰侧板锁口构造

2.3 结构计算

采用 Midas 建模,分别对围堰在封底工况、抽水工况及浇筑 1.5 m 承台工况下各构件受力进行验算。封底工况计算模型如图 4 所示。抽水工况计算模型如图 5 所示。

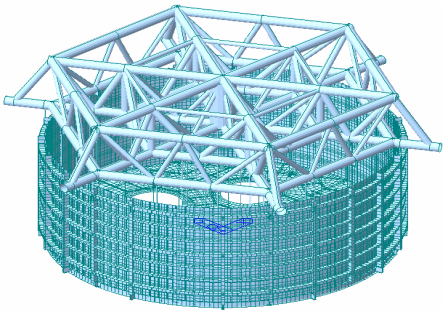


图4 吊箱围堰封底计算模型

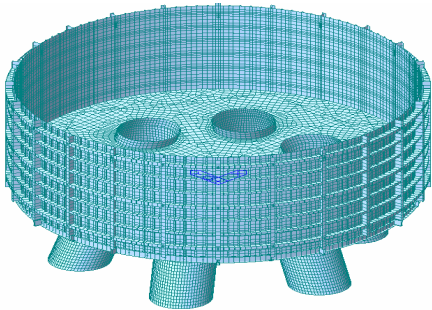


图5 吊箱围堰抽水计算模型

2.3.1 钢结构构件受力计算

各钢结构构件受力计算结果如表 1 所示。
由表 1 知:吊箱围堰各钢结构构件受力满足要求。

2.3.2 封底混凝土受力计算

(1) 抽水工况

封底混凝土在抽水工况下受到的主拉应力如图 6 所示。

表 1 吊箱围堰受力计算结果

部位	构件名称	构件规格	构件受力/MPa		允许应力/MPa
			封底工况	抽水工况	
底板	主龙骨	HN396×199	149.0		187
	次龙骨	HN248×124	150.0		187
	小肋	∠63×6	96.0		187
	面板	δ=6	66.0		187
侧板	圈梁	T384×200×10×12		176.0	264
	横肋	T290×150×10×10		91.3	264
	竖肋 1	HN396×199		115.0	264
	竖肋 2	∠75×8	10.6	92.7	264
吊架	壁板	δ=6	12.0	225.0	264
	弦杆	φ630×8	71.0		187
	腹板 1	φ450×14	63.0		187
	腹杆 2	φ325×6	46.0		187
吊杆 φ32 JL930		240		372.0	

注:构件规格的单位均为 mm。

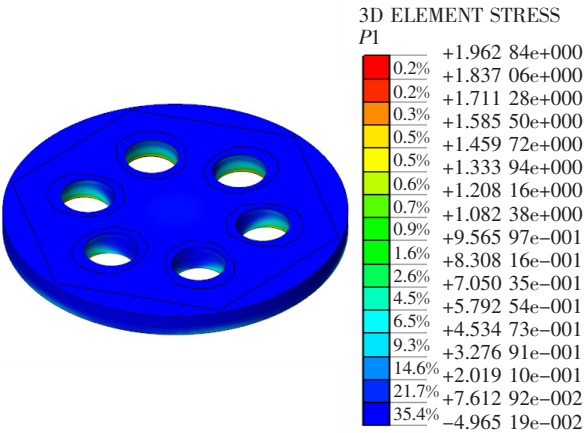


图 6 抽水时封底混凝土主拉应力云图(单位:MPa)

由图 6 可知:除封底混凝土与 φ3 000 mm 钢桩交界位置处底部局部出现应力集中外(最大值为 1.96 MPa),96.1%保证率封底混凝土最大主拉应力小于 $[f_t]=1.0$ MPa,满足要求。抽水工况下封底混凝土与单根钢桩黏结力合力 $N=1\,550$ kN。不考虑钢桩倾斜对黏结应力的有利影响,封底混凝土与钢桩黏结应力 $\tau=1\,550/(3.14\times3\times1.2)=137$ kPa<150 kPa,满足要求。

(2) 浇筑 1.5 m 承台混凝土工况

浇筑(1.5 m)承台工况下封底混凝土计算需考虑施工水位(低水位)情况。计算得封底混凝土主拉应力如图 7 所示。

由图 7 可知:除封底混凝土与 φ3 000 mm 钢桩交

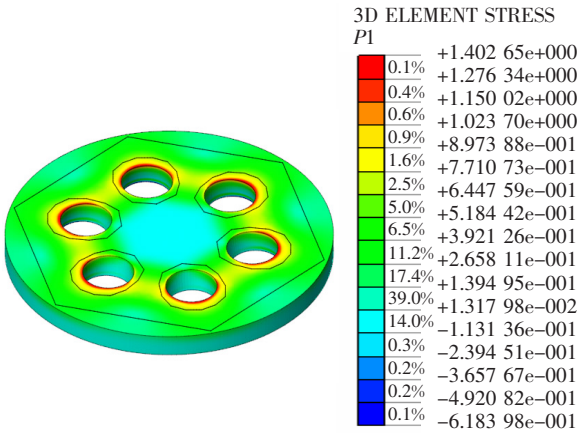


图 7 浇筑 1.5 m 承台时封底混凝土主拉应力(单位:MPa)

界位置处顶部局部出现应力集中外(最大值为 1.4 MPa),98.5%保证率封底混凝土最大主拉应力小于 $[f_t]=1.0$ MPa,满足要求。浇筑(1.5 m)承台工况下封底混凝土与单根钢桩黏结力合力 $N=1\,614$ kN。不考虑钢桩倾斜对黏结应力的有利影响,封底混凝土与钢桩黏结应力 $\tau=1\,614/(3.14\times3\times1.2)=143$ kPa<150 kPa,满足要求。

综上所述,锁口钢吊箱围堰结构满足要求。

3 围堰施工

3.1 加工制造

(1) 吊架制作

吊架为全钢管空间桁架结构,桁高 3.5 m,质量 81 t。吊架杆件由钢结构车间下料制作,分别运输至砂石料码头组拼完成,所有结构表面均需涂刷油漆。

(2) 吊杆

吊杆为标准件,根据设计长度定尺采购。

(3) 侧板制造

为保证外型尺寸的准确性及控制焊接质量和变形,侧板制造借助胎架组拼及施焊,胎架应具有足够刚度。侧板制造由钢结构车间下料制作,每块侧板之间都需试拼装并做好编号,确保 6 块侧板结构能顺利拼装成整体。侧板结构外表面均需涂刷油漆。

另外,每套围堰选定一块侧板位置布置连通管,连通管标高从底部向上 1.8 m,通过在侧板上开洞并焊接一根内径 100 mm、长约 300 mm 的钢管,利用塑料软管进行连接,塑料软管要有一定硬度和韧性,长度满足用绳拴住其端部挂到围堰顶面的要求。

(4) 底板制造

底板由主龙骨、次龙骨、角钢、钢底板及堵漏板等构成,高度 0.402 m,底板最外侧直径 19.5 m。底板结构平分为 6 块,由钢结构车间下料制作,再运输至砂石料码头组焊成整体。

3.2 围堰组拼

为保证拼装质量和拼装速度,吊箱围堰在总拼之前,需对吊挂梁、底部和侧板单元块件进行检查,确保每块构件均是结构尺寸和焊缝质量都合格的部件。每套钢吊箱围堰总拼均在砂石料码头进行,采用水上浮吊配合施工。

吊箱围堰组拼时,先吊装底板,并抄垫平衡,然后安放底板与侧板的连接处 10 mm 厚胶皮,吊装第 1 块侧板,需确保侧板位置准确,安装侧板与底板连接的精轧螺纹到理论长度即可,完成第 1 块侧板安装后,顺利安装其他侧板,需对锁口部位涂黄油保证锁口位置安装顺利进行。侧板安装过程中,注意前面 3 块板在每次安装结束后均需在内侧设置缆风绳,以免侧翻。侧板全部安装结束后,按设计图安装限位档块,以防止不利因素造成侧板底部外移而使围堰漏水。

全部侧板安装完成后,利用对称穿心顶将侧板与底板连接的精轧螺纹收紧,预拉 100 kN 左右的力,完成后全面检查底板与侧板接缝处的密贴情况,确认无问题后,再吊架 6 根主吊挂横梁与侧板交叉位置侧板顶面,用长度为 744 mm 的 $\phi 325 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管焊接支撑,然后整体吊装吊架与围堰组装成整体,并安装其余全部吊杆,调整到需要的长度。

各桩位封堵板提前放到孔位附近,封堵板周围采用钢板限位。同时需提前采用两根 $\phi 16 \text{ mm}$ 圆钢对位穿过封堵板的螺栓孔,并准备两个 1 t 倒链,安排 1 组共计两人水下拼接封堵板,采用 1 t 倒链通过圆钢将封堵板对位,使用 $\phi 28 \text{ mm}$ 普通螺栓连接。

吊箱围堰拼装成整体后,锁口钢管靠围堰内侧的小腔室采用拌制好的软黏土条填充,并用钢筋捣实,用于防水。

3.3 围堰现场安装

(1) 钢斜桩插打完成后,先在墩位按设计位置插打防撞桩,防撞桩上要求安装警示灯和标示牌,严禁外来船只靠近。

(2) 在每根钢桩顶部安装临时接高支承柱,支承柱设计顶标高为 7.20 m,再安装调整楔块。调整楔块标高调整范围为 $\pm 5 \text{ cm}$,如支承柱安装后顶面标高低于理论标高 5 cm,通过抄垫钢板方式进行调整楔块顶标高,确保调整楔块顶面标高为 7.66 m。

(3) 利用 500 t 浮吊整体起吊围堰下河,通过 1800 t 平板驳运输到墩位,500 t 浮吊抛锚就位后,整体起吊钢吊箱围堰进行安装。吊箱围堰安装时测量人员随时监控围堰平面位置。围堰下放入水安装时应选择在水流潮汐、波浪力等冲击作用不明显的环境下进行,确保围堰准确定位。

(4) 松钩将钢吊箱围堰缓慢下放至设计标高,将吊挂系统与支承钢护筒上的垫块焊接。复核侧板顶标高,侧板顶部设计标高为 +7.0 m。测量复核围堰倾斜度和平面位置,围堰倾斜度要求控制在 1/250 以内,平面位置控制在 100 mm 以内。同时在吊挂梁下焊接牛腿,采用楔块将牛腿和钢管立柱顶紧,确保 6 根钢管立柱和吊架形成一个稳定的整体结构。

(5) 潜水工水下清除底板杂物,使用钢刷清除钢桩表面封底区域的杂质。将预先放于桩孔附近的两半封堵板连接用于封底底板与桩壁之间的空隙,并用 $\phi 80 \text{ mm}$ 的布袋(内装水泥和细砂干拌制成的砂),将钢桩一周与封堵板之间的小缝隙再进行封堵确保围堰堵漏成功。

3.4 围堰封底

围堰封底采用整体式作业平台,整体吊装到围堰吊架上。封底混凝土强度等级为 C40,厚度为 1.3 m,采用常规水下导管拔球法施工。考虑混凝土水上运输情况和孟加拉高温天气,浇筑导管按混凝土有效扩散半径为 3.0 m 进行设置,共布置 18 个灌注点(图 8)。除 1# 导管拔球采用泡沫球外,其余导管底部均采用钢

板和橡胶圈封堵,钢板用钢筋和铁丝与导管固定住,导管底口比吊箱围堰底板上的角钢高 35 cm。待 3 m^3 拔球料斗内混凝土灌满后,根据指令将铁丝割断,导管底部盖板打开,混凝土开始下流,然后适当下放导管,使导管底口距围堰底板上角钢 20 cm,继续灌注混凝土。

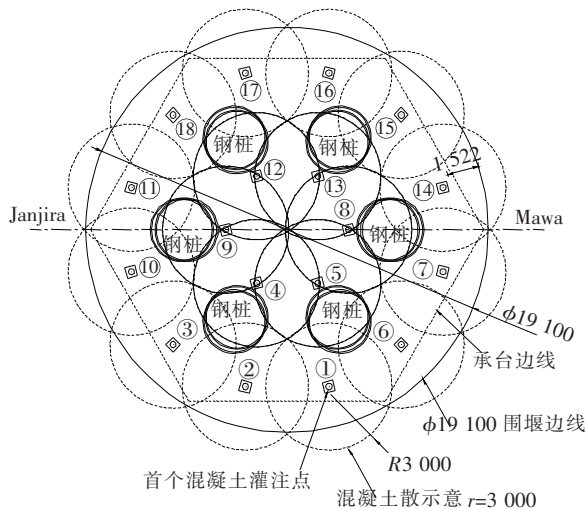


图 8 围堰封底导管布置图(单位:mm)

封底时按规定测量混凝土顶面高程,并及时反馈给指挥中心,以全面了解钢吊箱围堰内各个点水下混凝土面的标高情况。钢桩周围 50 cm 区域内要求达到设计标高,其余区域按低于 10 cm 进行控制。

3.5 吊挂系统拆除及封底找平

封底混凝土达到设计强度 90% 后抽水,拆除吊挂系统和临时立柱,对封底混凝土进行清洗、凿毛,用 C40 混凝土找平,找平混凝土达到设计强度后,在围堰内进行桩内处理及后续承台施工。

3.6 吊箱围堰拆除

桩内处理完成,承台施工结束后,拆除承台模板,逐块解除侧板和底板之间的约束,抽出围堰侧板,可重复用于其他围堰的底板。

4 结语

孟加拉国 Padma 大桥主桥墩位多,工期紧,施工

期水位变化大,采用可快速装拆倒用的锁口围堰作为桩内处理和承台施工挡水设施,其结构简单、安装方便,使用效果良好,使用过程中未发现影响现场施工的漏水情况;围堰设计充分利用了钢斜桩自身作为承载结构,省去了传统围堰安装所需的复杂临时设施;侧板间锁口连接及吊挂结构与围堰间的精轧螺纹连接使得围堰受力合理,装拆方便,倒用不易损坏,熟练应用后进行围堰拼装仅需 3 d、侧板拆除仅需 1 d 即可完成,大大减轻了围堰装拆所需的机械设备和人力资源压力。锁口单壁钢吊箱围堰在该项目的成功应用对该桥下部结构施工的快速推进具有重要意义,可为同类型基础施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] Sham S H R, Yu G X, De Silva S. Foundation Design Methodology for Padma Main Bridge[C]. Proc. IABSE-JSCE Conference, Dhaka, 10-12 August, 2010.
- [2] Sham S H R, Tapley M J. The Design of Padma Multi-purpose Bridge - Challenges and Solutions in Design of the River Spans[C]. Proc. IABSE-JSCE Conference, Dhaka, 10-12 August, 2010.
- [3] 王崇艾. 锁口式钢套箱围堰的设计与施工[J]. 铁道建筑技术, 2006(1).
- [4] 黄剑锋. 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥围堰设计[J]. 桥梁建设, 2015(4).
- [5] 于军港, 陈永强, 张波. 深水基础单壁钢围堰有限元计算及施工[C]. 全国现代结构工程学术研讨会, 2014.
- [6] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].
- [7] 江正荣, 朱国梁. 简明施工计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [8] 钱玉山. 锁口围堰在浅水高桩承台施工中的应用[J]. 门窗, 2013(3).
- [9] 石立成. 澳门西湾大桥吊箱围堰施工承台技术[J]. 铁道标准设计, 2006(1).
- [10] 孙国光. 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥埋置式承台止水方案比选[J]. 桥梁建设, 2017(6).
- [11] 王会永. 双壁钢板桩围堰施工技术与管理运用[J]. 中外公路, 2019(1).