

铁路跨河桥梁承台钢吊箱施工技术

胡喜兄, 吕怀

(中交一航局第四工程有限公司)

摘 要:为解决登嘉楼河深水承台施工中面临的水深流急、地质复杂、潮汐影响,提高承台施工质量,采用钢吊箱施工方法,从优化钢吊箱的结构设计、下放、止水密封及水下混凝土封底等关键工艺,有效解决了复杂水文地质条件带来的困难。实践证明:钢吊箱技术方案有效确保了水中承台的施工质量与结构安全,其混凝土强度合格率达 100%,尺寸偏差完全符合设计规范,整体工期较原计划提前 10 d 完成,成本降低约 5%。通过钢吊箱施工技术研究发现,经创新优化的钢吊箱技术是应对复杂水域桥梁基础施工的一种安全、经济、高效的施工工法,其技术经验与管控措施可为今后类似环境下的跨河桥梁深水工程施工提供重要的实践参考与借鉴。

关键词:铁路;跨河桥梁;承台;钢吊箱;水文地质;同步下放;质量控制

0 引言

随着全球铁路网络的快速发展,跨越大江大河、海峡的铁路桥梁工程日益增多。尤其是东南亚地区,河流众多、水文条件复杂,桥梁基础施工面临巨大挑战。登嘉楼河作为马来西亚东海岸的重要河流,其宽阔的河面、较大的水深和较快的流速使得传统围堰施工技术难以实施。

钢吊箱施工技术因其独特的优势,成为解决这一难题的重要方法。与传统围堰技术相比,钢吊箱具有结构刚度大、施工周期短、对河床干扰小、可重复利用等特点。特别在水深流急的河流中,钢吊箱能够为承台施工提供干燥、安全的作业环境,有效保障施工质量和进度。本文结合马来西亚东海岸铁路项目控制性工程——60 号特大桥 P100 水中承台施工实例,全面总结了钢吊箱从设计优化、现场拼装、体系转换、精准下放、止水密封到最终浇筑封底混凝土的全过程,重点研究分析了施工过程中稳定性控制、深水密封可靠性、大体积水下封底混凝土质量控制等关键技术难点,得出针对性创新解决方案与实施效果。通过系统性的工程总结,为国内外同类型工程施工提供坚实的技术支撑与实践范例。

1 钢吊箱施工

1.1 钢吊箱的结构体系与工作机制

钢吊箱是一种有底围堰结构,在承台位置周边形成一个临时性的密闭防水空间。施工时,将制作好的模板运至现场拼装,然后通过临时护筒

上的承吊系统下沉至设计高程,再进行可靠的止水、密封处理,最后在箱体底板浇筑水下封底混凝土,从而构成一个封闭的底部支撑与止水系统。待封底混凝土达到设计强度后,抽干吊箱内部积水,形成一个完全干燥的施工作业环境,以便于进行承台钢筋、模板及混凝土工程的施工。这种结构不仅能有效阻隔外部水体,还能承受水压力等外部荷载,为承台施工提供安全保障。

一套完整的钢吊箱系统结构主要包括 5 部分。

1) 支撑系统:包括安装平台、承重梁(纵梁与横梁)及牛腿等,为整个结构提供稳定可靠的平台。

2) 围护系统:由钢制侧模和底板共同构成,形成阻隔外部水体的封闭空间,是直接承受水压的主要受力构件。

3) 密封系统:通常由高性能橡胶止水带、遇水膨胀止水条以及水下封底混凝土等组成,确保钢吊箱与钻孔桩钢护筒之间、各模板单元拼缝之间以及底板与封底混凝土接触面的密封性。

4) 吊装与下放系统:包括精轧螺纹钢筋吊杆、液压千斤顶、扁担梁及同步控制装置等,负责实现钢吊箱平稳、精确、同步的沉放动作与精确定位。

5) 辅助系统:包括导向装置、定位测量、内支撑以及监控传感器等,用于保障施工过程中的几何精度、结构稳定性与操作安全性。

1.2 钢吊箱技术适用条件及工程选型

一般钢吊箱适用于以下工程条件:1) 水深较

大(通常超过5 m)的河流、湖泊区域,不利于其他围堰施工。2) 承台底面标高位于施工期间常水位以下,与现有河床面之间有一定净空,避免了河床开挖工作。3) 水流速度相对较高(1.5~2.5 m/s),要求围堰结构具备良好的抗水流冲击能力。4) 河床地基土质条件较差,不适合打入式板桩围堰的顺利下沉与嵌固。5) 工程地处水源保护区、生态敏感区或通航繁忙水域,需要对水质及长期阻水进行严格控制。

项目实施时需根据承台平面尺寸、水深、流速以及起重设备能力等综合分析后,确定采用单壁或双壁结构、整体吊装或分块拼装等具体方案。

2 工程实例与核心工艺

2.1 工程概况

马来西亚东海岸铁路(ECRL)项目中60号特大桥跨越登嘉楼河,河面宽约400 m,水文条件复杂。根据近几年的水文观测与地质勘察数据:河道最大水深达10.2 m,平均流速为1.9 m/s,受临近南海的潮汐作用影响,水位日变幅最大可达1.2~1.5 m,呈现明显的双向流特征。

本文研究的P100墩承台为该桥深水区关键基础,承台设计为橄榄形,结构尺寸长×宽×高为27.3 m×14.5 m×4.0 m,承台底标高距河床面约1.8 m,常年淹没于水下。该承台施工面临的挑战主要包括:持续水流与潮汐循环荷载对临时结构的疲劳效应、深水环境下密封系统的可靠性、大体积水下封底混凝土的连续浇筑与质量均匀性控制及在保证安全与质量的前提下缩短水上作业时间。承台采用分块拼装、现场组焊的单壁钢吊箱配合智能同步下放系统,兼顾技术可靠性与经济性的最优选择。

2.2 钢吊箱设计与优化

根据工程特点,采用数值模拟方法对钢吊箱进行了全方位优化设计。

2.2.1 结构设计

底模与侧模均采用分块式设计,便于运输与现场拼装。侧模在高度方向上划分为2.5 m+2.5 m+1.7 m三个节段,既考虑了吊装设备的起重能力,也优化了模板的受力性能。利用有限元分析软件,建立了钢吊箱的三维模型,模拟计算其在吊装、下放、抽水等各工况下的结构强度、刚度及稳定性。计算荷载包括了结构自重、静水压力、流水压力(按最不利流速2.2 m/s考虑)。计算结果表

明,在侧模关键部位增设竖向加劲肋与水平周圈梁(间距约为1.2 m)后,最大等效应力控制在Q345钢材屈服强度的0.85倍以下,结构变形满足 $L/400$ (L 为竖向加劲肋与水平周圈梁间距)的规范要求。通过有限元分析软件进行结构强度验算及运用流体力学软件模拟水流冲击效应(见图1、图2),对吊箱侧模外形进行了微小的流线形优化,并确定了内支撑系统的最佳布置间距与形式,有效降低了水流阻力与振动风险。

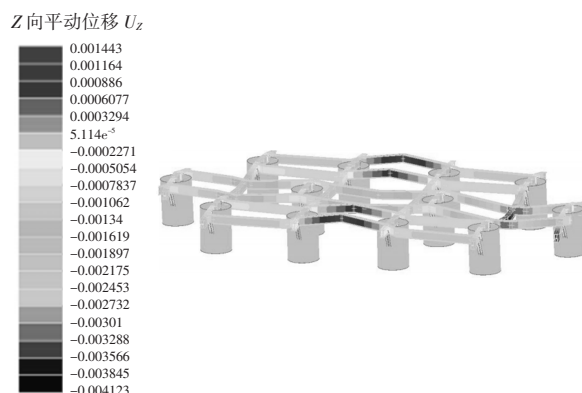


图1 钢吊箱承吊系统及吊箱底模建模图

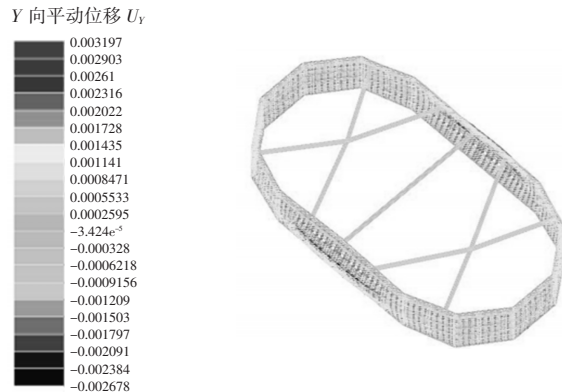


图2 钢吊箱混凝土浇筑及水流冲击建模图

2.2.2 创新技术

1) 双重密封系统:针对钢护筒与吊箱底板之间的动水密封难题,创新性地提出了“主密封+辅助密封+应急保障”的三级密封方案,主密封采用氯丁橡胶止水带,辅助密封采用遇水膨胀密封胶条,应急保障则是在吊箱内预备了快硬水下堵漏材料,同时配合水下焊接工艺,确保吊箱与桩基间完全密封。

2) 精确定位系统:底板上设置高精度定位销,侧模对应位置开设销孔,通过全站仪测量调整位置,以确保首节侧模安装平面位置误差不大

于 ± 2 mm。侧模与护筒间设置可调节的限位导向装置,采用丝杠调节系统,配合高强度滑轨,确保下放过程中钢吊箱的平面位置稳定和垂直度偏差小于 $H/1\ 000$ (H 为下沉深度)。

3) 智能同步下放系统:该系统主要由1台DL-P40计算机、2台DL-L30/4/D油泵及4台千斤顶组成,采用计算机控制油泵,油泵连接千斤顶。每台千斤顶均配备有高精度长行程位移传感器(精度为0.1 mm)和油压传感器。工作原理是:在整体下放钢吊箱时,各吊点的位移传感器实时监控下放同步情况,将数据反馈给中央控制器。中央控制器处理后,再发出协调指令,动态调整各千斤顶的动作,从而实现群顶同步控制,确保平稳、精准下放^[1]。

2.3 钢吊箱施工工艺

钢吊箱施工是一个多工序、多专业交叉的复杂过程,其工艺流程环环相扣,任何环节的疏忽都可能导致严重后果。

2.3.1 施工平台安装与测量控制

钻孔桩施工完成后,首先拆除钢平台(只拆除承台部分区域)。然后精确测量放样,在每根钢护筒上安装I32a牛腿。然后安装承重纵、横梁(均为I25a),采用摩擦型高强度螺栓。平台安装完成后,使用全站仪进行整体网格测量与验收,平台平面度偏差要求小于10 mm。

2.3.2 钢吊箱拼装及精度控制

钢吊箱拼装遵循“先底模、后侧模、再支撑”的顺序。

1) 底模安装:在验收合格的平台上,按照编号依次拼装模板,同时使用全站仪监测,随时调整,确保安装精度。

2) 侧模安装:首节侧模利用底模上焊接的定位销孔实现初定位,然后利用千斤顶或手拉葫芦进行微调,确保垂直度误差控制在 ± 3 mm以内。首节侧模安装完成后,进行外圈梁、第2节和第3节侧模安装,首节与第3节侧模与护筒间需要安装限位、导向装置,保证钢吊箱下放过程位置的稳定及垂直度。导向装置由丝杠和滑轨组成,滑轨与护筒接触两侧设置加劲板与护筒焊接增强滑轨的稳定性,以便于钢吊箱能保持良好的姿态下沉。

3) 承吊系统安装:承吊系统均采用双拼I32a作为承重纵、横梁,吊杆采用JL32 mm精轧螺纹

钢,长度12 m。主墩钢吊箱共计28个吊点,其中有4个吊点用于吊箱下放,每个下放点处设置1台YCW1000C型双作用中空液压千斤顶。

根据图纸依次安装牛腿、纵梁、横梁、扁担梁、千斤顶及分配梁,最后进行吊杆安装。吊杆下端螺母和垫板点焊在底横梁上并伸出螺母15 cm,上端伸出千斤顶或承重梁。考虑吊杆拆除,每根吊杆外穿1根4 m长 $\phi 48$ mm外套管与封底混凝土隔开,套管上端与吊杆固定,并塞海绵、缠胶带进行封堵,抽水过程中逐步拆除吊杆并将其封堵防止漏水。

2.3.3 钢吊箱下放及体系转换

钢吊箱下放是整个施工过程中风险最高、技术要求最严格的环节。下放前进行全面检查,包括结构连接、机械设备、电气线路及监控系统。下放时先由4台千斤顶在计算机控制下同步顶升,使吊箱自重由拼装平台平稳转换至承吊系统,完成首次体系转换,然后抽出拼装平台上的纵、横梁遵循“小行程、多循环、勤校正”的原则进行钢吊箱下放。下放由扁担梁上下2组螺母垫片交替锁紧进行,每次下放不超过18 cm(千斤顶行程),各下放点均匀、同步下放。每完成一个行程,各吊点暂停,计算机系统自动进行数据比对与调整,确保同步性。测量组同时使用全站仪实时监测吊箱顶面四角标高与平面位置,并与千斤顶位移数据相互校核。智能下放是通过长距离位移传感器和油压传感器适时监控千斤顶的位移及荷载同步性,并根据监测结果适时调整,保证位移和荷载同步性控制在允许范围以内^[2]。整个下放过程持续约6 h,最终就位精度为:平面位置偏差 ≤ 15 mm,顶面标高差 ≤ 10 mm,完全满足设计要求。

2.3.4 水下密封、抗浮压杆及内支撑安装

钢吊箱到位后,潜水员进行水下作业。首先清除护筒与底板之间淤泥等杂物,然后依次安装橡胶止水条和遇水膨胀密封胶条,最后安装护筒周边的封盘,并使用砂袋等材料压实。密封完成后进行抗浮压杆等设施、内支撑的安装,最后打开闸阀,平衡钢吊箱内外水压。

2.3.5 水下封底混凝土施工

水下封底混凝土有4个作用:

- 1) 作为配重平衡浮力与重力;
- 2) 阻水防漏;

3) 抵抗水浮力在钢吊箱底板形成的弯曲应力;

4) 作为承台的承重底模^[3]。

封底混凝土总厚度为 1.2 m, 混凝土强度等级为 G40(C40), 混凝土分 2 层浇筑, 第 1 层水下浇筑 1.0 m。混凝土的浇筑采用多点导管法进行水下浇筑, 布置 9 根导管灌注点, 浇筑过程由 1 辆汽车泵、1 辆履带吊配合进行, 履带吊负责对导管及料斗进行移动, 汽车泵负责向料斗输送混凝土。

浇筑前进行技术交底与现场模拟。浇筑时, 严格按照经过计算的扩散半径(约 2.5 m)和确定的顺序(浇筑过程以护筒为中心, 从上游侧承台向下游侧浇筑)进行, 确保新老混凝土良好结合, 避免冷缝出现。浇筑过程中安排专人使用测锤与水下摄像系统持续监测各点混凝土面上升情况, 重点检测导管作用半径相交处、护筒周边和吊箱内侧面周边等部位。

第 1 层封底混凝土强度达到设计强度的 90% 后从钢吊箱内抽水, 抽水后拆除全部吊杆并封堵套管孔洞。随后浇筑第 2 层 0.2 m 厚的混凝土, 作为承台底模的找平层与垫层。最后拆除临时拉压杆及割除上部多余的钢护筒, 从而完成第二次体系转换。由原来的临时拉吊系统转换为由辅助拉压杆和封底混凝土与钢护筒之间的握裹力共同承受钢吊箱和承台施工期间的所有荷载^[4]。

3 技术难点与解决方案

3.1 水流冲击影响钢吊箱稳定性

登嘉楼河平均流速达 1.9 m/s, 将产生较大水流冲击力; 潮汐变化导致水流方向改变; 钢吊箱下放过程中易产生振动和偏移。创新型解决方案如下:

1) 结构加固及优化措施: 基于 CFD 流场分析结果, 对钢吊箱迎水流面的侧模外形进行了“倒角”处理, 使其更趋流线形, 有效减少了绕流涡旋的生成。在结构上增加了水平周圈梁的设置密度, 并在侧模内侧焊接了密集的竖向加劲肋, 将大面积的板件分割成更小的区格, 显著提高了侧模的抗弯刚度与局部稳定性。

2) 优化钢吊箱结构措施: 增加可调节限位、导向装置, 确保在下放过程中, 钢吊箱能保持良好的姿态下沉且保证垂直度符合要求。

3) 优化下放方式: 钢吊箱在模板高度方面, 采用分层技术, 下放过程分层安装侧模, 逐步降

低钢吊箱的沉降速度, 避免快速下沉时产生的冲击力。同时采用智能同步下放系统, 不仅能保证四吊点的绝对同步, 还能避免因不同步导致的箱体扭曲。

3.2 封底混凝土施工技术难度大

由于封底混凝土为水下浇筑, 混凝土方量大, 且浇筑时间长。混凝土浇筑质量影响钢吊箱止水、封底效果。因此混凝土质量控制为施工重中之重。解决措施如下:

1) 水下多层密封系统

采用以可调节封盘和优质橡胶止水带为主、遇水膨胀胶条为辅助的多层密封系统, 同时备有快速堵漏材料作为应急封堵。

2) 优化浇筑工艺及全过程立体化监控

采用多点导管法的“网格化布点、分层递进”浇筑工艺进行水下浇筑。浇筑前编制《导管负责区域图》与《浇筑顺序网络图》。浇筑时严格按照制定的施工方案推进。

同时采用“传统测量+现代传感”相结合的方式对浇筑过程进行全方位监控。除了常规的测绳测量混凝土面标高外, 首次尝试引入了水下高清摄像系统, 在能见度允许的情况下, 辅助观察混凝土的流动状态与混凝土界面情况。

3) 质量控制措施

针对水下浇筑特点进行多次配合比试配, 最终确定的配合比中, 适当提高胶凝材料用量(主要采用 P·O 42.5 水泥辅以粉煤灰), 减少用水量, 并同时掺入了高效减水剂与缓凝剂, 以提高混凝土的流动性和延长混凝土的初凝时间, 保证封底混凝土与钢护筒壁间的黏结力^[3]。

4 应用效益

通过采用钢吊箱施工技术与管理措施, 马来西亚东海岸铁路 60 号特大桥水中承台施工取得了显著成效。

1) 技术可行性: 经过精细化设计与智能化控制的单壁钢吊箱围堰技术, 能够有效应对水深流急、地质复杂、受潮汐影响等严峻挑战, 是解决大型跨河桥梁深水承台施工难题的可靠、高效技术路径。

2) 可推广性: 通过结构优化、双重密封系统、智能同步下放控制、“传统测量+现代传感”相结合的监控等系列创新技术, 为解决钢吊箱施工中的稳定性、密封性、精准性与质量均匀性等传

统问题提供了有效的解决方案,具备较高的推广价值。

3) 经济效益:相较于原施工计划,水中承台施工总工期比原计划提前 10 d 完成。该技术方案在保障工程安全与质量的前提下,缩短了工期的同时又大幅节约了成本,最大限度地减少了对环境的干扰,取得了技术、经济、环保多方面的综合效益,彰显出了现代桥梁施工技术发展的先进方向。

4) 施工效果:施工完成的钢吊箱止水效果优良,无渗漏现象,承台混凝土强度合格率为 100%,结构尺寸偏差符合设计要求;整个施工周期未发生任何安全责任事故,实现了“零伤亡、零污染”的 HSE 管理目标。

5 结语

依托马来西亚东海岸铁路 60 号特大桥登嘉楼

河水中承台工程,针对潮汐河道水深流急、水文条件复杂等难题开展研究,通过优化单壁钢吊箱结构设计,创新采用三级密封体系、智能同步下放及多点导管水下封底等工艺。工程应用效果良好,吊箱止水可靠、结构稳定,承台实体质量全部达标,其中相关技术措施有效攻克潮汐水域深水承台施工重难点,可为国内外同类跨河铁路桥梁深水基础钢吊箱施工提供实践借鉴。

参考文献:

- [1] 欧阳效勇,任回兴,赵文光,等. 钢吊箱计算机同步控制整体下放关键技术[J]. 华中科技大学学报,2006(2):75-79.
- [2] 李明雨,徐伟. 大型深水钢吊箱下放施工技术[C]//第二届全国钢结构施工技术交流会论文集. 2008.
- [3] 翁湛. 高桩承台钢吊箱围堰的设计与施工[J]. 浙江水利水电专科学校学报,2009,21(1):16-19.
- [4] 茹启江,刘成钢,杜雄伟,等. 浅海区高桩承台钢吊箱围堰施工关键技术[J]. 铁道建筑,2016(3):54-57.