

深水高桩系梁新型单壁钢吊箱围堰施工关键技术研究

杨金龙, 赵林*, 江群龙

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:为确保安全、高效、经济地完成暮坪湘江特大桥深水高桩系梁施工,该文针对高桩系梁所在位置水位深、地层覆盖层浅的特点,结合项目实际情况,设计出一种新型单壁钢吊箱围堰来作为高桩系梁施工时的挡水与围护结构。通过在钢吊箱围堰底板上设置钢套管的创新设计,降低了壁板设计高度,节省了钢材投入量;在创新设计的基础上,优化封底施工工艺,区别于传统钢吊箱满封底施工工艺,新型单壁钢吊箱围堰仅需在钢套管内浇筑封底混凝土,在满足结构受力与体系稳定的前提下,大幅度减少了封底混凝土方量,节省了施工成本;通过在封底混凝土表层加焊劲板的方式,提升了整个结构体系的稳定性,进一步保障了水中作业安全。水中桩系梁施工效果较好,表明新型单壁钢吊箱围堰较适用于深水高桩系梁施工。

关键词:桥梁工程;高桩系梁;钢吊箱围堰;力学性能;数值模拟;施工技术

中图分类号:U445.556

文献标志码:A

Key Technology for Construction of New Single-Wall Steel Suspended Box Cofferdam with High Pile Tied Beams in Deep Water

YANG Jinlong, ZHAO Lin*, JIANG Qunlong

(CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: In order to ensure the safe, efficient, and economical completion of the construction of the high pile tied beam of Muping Xiangjiang River Bridge in deep water, a new type of single-wall steel suspended box cofferdam was designed to act as the water retaining and enclosure structure during high pile tied beam construction according to the characteristics of deep water level and shallow stratum cover layer at the high pile tied beam location. Through the innovative design of steel casing on the bottom of the steel suspended box cofferdam, the design height of the wall panel and the amount of steel input were reduced. On the basis of innovative design, the bottom sealing construction process was optimized. Different from the traditional full bottom sealing construction process of the steel suspended box, the new single-wall steel suspended box cofferdam only needed to pour the bottom sealing concrete in the steel casing, which greatly reduced the amount of bottom sealing concrete and saved the construction cost under the premise of satisfying the structural force and system stability. The stability of the whole structure system was enhanced by welding the stiffening plate on the surface of the bottom sealing concrete, and the safety of operation in water was further guaranteed. The construction effect of pile tied beams in water was good, which indicated that the new single-wall steel suspended box cofferdam was more suitable for the construction of high pile tied beams in deep water.

Keywords: bridge engineering; high pile tied beam; steel suspended box cofferdam; mechanical property; numerical simulation; construction technology

收稿日期:2024-08-31(修改稿)

基金项目:中交第二航务工程局有限公司科技研发项目(编号:EHYF-2021-B-05-037)

作者简介:杨金龙,男,高级工程师.E-mail:535782181@qq.com

*通信作者:赵林,男,硕士,工程师.E-mail:364709255@qq.com

0 引言

近年来,随着基础建设的迅速发展,桩柱式桥墩因其混凝土用量少、线形修长美观且经济性好而被广泛运用于桥梁的设计与施工中^[1-4]。通过在桩柱式桥墩中设置系梁,将双排柱连成整体,不仅增强了结构刚度,还提升了结构稳定性。

陆上桩系梁的施工工艺相对常规,一般可通过放坡开挖法或钢板桩先支护后开挖法进行施工^[5-9]。然而,水中高桩系梁的施工工艺相对复杂,通常采用钢吊箱围堰辅助施工^[10],但传统的钢吊箱围堰用钢量大,封底工艺复杂^[11-12],起重吊装量大^[13],施工安全风险高^[14],施工周期长^[15],施工组织难度大^[16-20]。

本文在深入研究传统钢吊箱围堰的受力机理与施工工艺的基础上,设计出一种新型钢吊箱,提升钢吊箱围堰施工效果,优化施工组织,在保障施工安全

的前提下,减少临时措施投入量,节省施工成本,并结合暮坪湘江特大桥的工程实例,从钢吊箱围堰设计、受力分析及关键施工工序等方面,对深水高桩系梁新型单壁钢吊箱围堰进行了详细的分析与研究。

1 工程概况

暮坪湘江特大桥横跨湘江两岸,东接暮云片区,西连大王山片区,是湖南省重点建设项目之一,项目建成后将成为天心区南部与湘江新区的重要过江通道,对促进区域化发展具有重要推动作用。

大桥主桥为(70+2×180+70)m四跨中承飞燕式钢桁架系杆拱桥,主桥长500m,主跨(2×180)m,主拱矢高36m,矢跨比为1/5,主梁采用叠合梁结构,横桥向采用双片钢拱架;东、西岸涉水引桥分别为跨度(4×63)m与(5×63)m等高度单箱单室钢-混凝土组合结构顶推梁桥,涉水桥梁立面布置如图1所示。

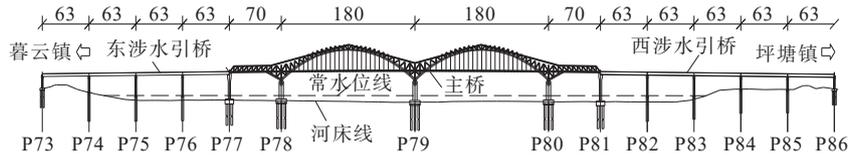


图1 涉水桥梁立面布置(单位:m)

Figure 1 Elevation layout of wading bridge (unit: m)

涉水引桥P75、P76、P82及P83桩系梁尺寸均为9.2m(长)×2.0m(宽)×2.0m(高),P82墩桩系梁立面布置如图2所示。

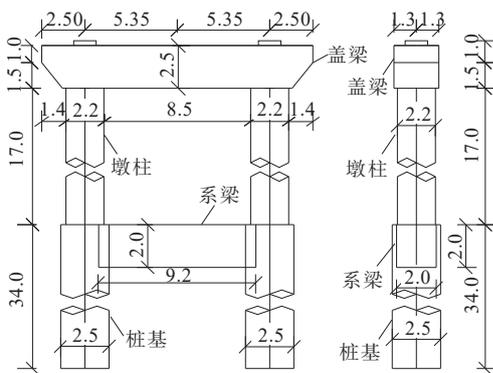


图2 P82墩桩系梁立面布置(单位:m)

Figure 2 Elevation layout of pile tied beam of P82 pier (unit: m)

2 钢吊箱围堰设计

适用于高桩系梁施工的方法有钢板桩围堰先支护后回填法和钢吊箱围堰法。考虑到本项目高桩系梁处水位深、覆盖层浅,钢板桩插打施工难度大;钢

板桩围堰施工完成后回填土方量大;钢板桩围堰施工周期长。综合比选分析后,本项目选择钢吊箱围堰作为系梁施工时的挡水与围护结构。

区别于传统钢吊箱设计,满封底工艺需要在整个底板上浇筑封底混凝土。本项目结合实际工况,设计出一种仅需要在桩基钢护筒与吊箱钢套管之间的空隙内浇筑封底混凝土的少封底工艺,在确保封底混凝土的黏结力及钢吊箱底板满足结构受力的前提下节约了封底混凝土方量。在满足桩系梁施工空间的前提下,对钢吊箱的结构及尺寸进行优化,进一步节省了钢材的投入量。

2.1 钢吊箱围堰结构

钢吊箱围堰作为桩系梁施工期间的挡水结构与桩系梁混凝土浇筑时的底模,其断面布置形式与桩系梁类似。综合考虑桩系梁施工节点及同时期湘江水位数据,钢吊箱围堰控制水位按照29.994m设计。钢吊箱围堰内轮廓尺寸设计为14.400m(长)×3.600m(宽)×5.393m(高)。钢吊箱围堰主要由钢

套管、钢底板、壁板、圈梁、内支撑,吊挂系统及其他附属结构组成,钢吊箱平面与立面布置如图3所示。

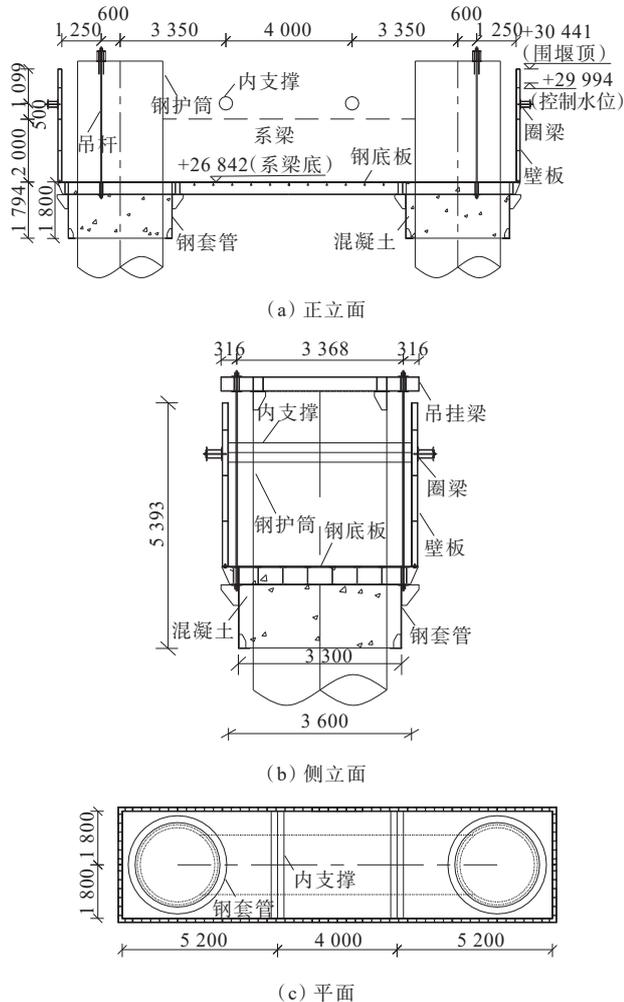


图3 钢吊箱平面与立面布置图(单位:mm)

Figure 3 Plane and elevation layout of steel suspended box (unit: mm)

钢套管规格 $\phi 3\ 300\ \text{mm} \times 12\ \text{mm} \times 1\ 800\ \text{mm}$,采用Q235B钢材,钢套管通过肋板与底板焊接成整体,钢套管与钢护筒之间的空隙采用圆环形封板封堵。钢吊箱底板为型钢网格分配梁底板,面板为6 mm厚Q235B钢板,主梁为I40a型钢,次梁为I10型钢,底板封边采用12 mm厚Q235B钢板,在桩位处开孔,开孔周围用4根斜主梁加固。壁板面板为6 mm厚Q235B钢板,水平肋为10 mm厚Q235B钢板,竖肋为I12型钢。圈梁采用2I32a型钢,沿钢吊箱壁体环向布置。内支撑采用 $\phi 426\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 钢管,仅设置一层,内支撑与圈梁处于同一标高。吊杆采用直径 $\phi 32\ \text{mm}$ PSB930级精轧螺纹钢,上端设双拼I32a吊挂梁,吊挂梁搁置在钢护筒上,通过千斤顶与吊杆实现钢

吊箱的整体下放。

2.2 钢吊箱围堰计算

通过Midas Civil有限元软件对施工过程进行模拟分析,其中材料参数选取软件默认参数,水头差按照3.152 m考虑,水流流速取2 m/s。

通过钢吊箱围堰下放和围堰工作两个工况对钢吊箱围堰各结构进行受力分析。

(1) 钢吊箱围堰下放工况

围堰下放工况中吊挂梁及吊杆受力最不利,其余结构相比围堰工作工况受力较小,故仅在此对吊挂梁及吊杆进行受力分析。通过有限元软件对吊挂梁及吊杆进行模拟分析,吊挂梁抗弯曲应力与抗剪切应力均满足材料受力要求,精轧螺纹钢吊杆安全系数满足要求。

(2) 钢吊箱围堰工作工况

钢吊箱围堰工作工况下主要对钢套管、封底混凝土、钢底板及壁板进行受力分析。

其中,钢套管、封底混凝土及钢底板进行建模分析时,需要考虑钢吊箱围堰抗浮与抗沉两种工况。围堰抗浮计算:套管封底混凝土浇筑完成后进行高水位下抽水作业时,围堰抗浮最为不利,控制水位+29.994 m。围堰抗沉计算:套管封底混凝土完成后浇筑系梁混凝土时,围堰抗沉最为不利,控制水位+29.994 m。

建立钢套管、套管封底混凝土、钢底板模型,如图4所示,对抗浮与抗沉两种工况进行包络。

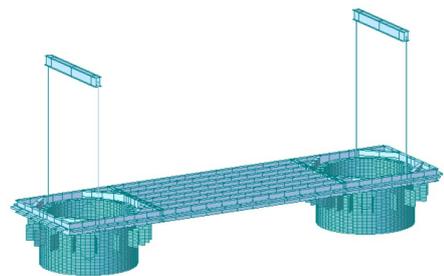


图4 钢吊箱计算模型

Figure 4 Calculation model of steel suspended box

由主拉应力云图(图5)知:套管封底混凝土承受最大拉应力为13.8 MPa,大于允许应力值1 MPa,但大于1 MPa的区域占比不足1%,这是由于应力集中现象造成的,绝大部分混凝土主拉应力为0.4 MPa,因此套管封底混凝土强度满足要求。

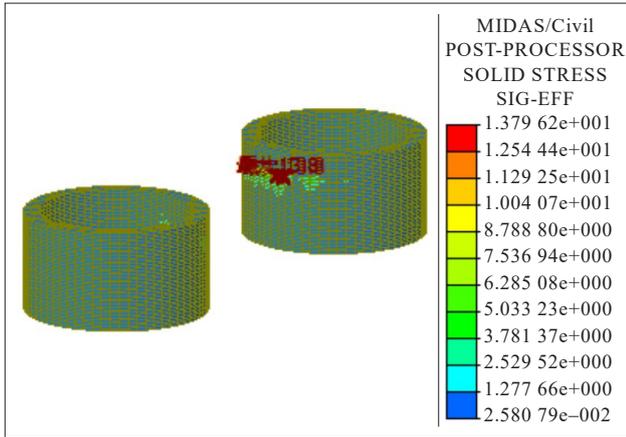


图5 封底混凝土应力云图(单位:MPa)

Figure 5 Stress nephogram of bottom sealing concrete(unit:MPa)

此外经计算钢护筒黏结力满足受力要求,钢套管、钢底板及壁板抗弯曲应力及抗剪切应力均满足结构受力要求。这表明钢吊箱围堰设计能满足系梁施工过程中的受力要求。

2.3 钢吊箱围堰设计特点

(1) 传统钢吊箱设计时,厚重的封底混凝土直接浇筑在钢吊箱底板上,钢吊箱体总设计高度需考虑封底混凝土厚度,使得钢吊箱总用钢量增大。而新型钢吊箱围堰通过增强底板设计和增设钢套管,封底混凝土直接浇筑在钢套管内,虽然增加了钢套管的用钢量,也略微增加了底板的用钢量,但与传统钢吊箱相比总用钢量仍大幅减少;结合系梁几何特征,在保证钢吊箱横向与纵向空间满足系梁施工的前提下,合理优化钢吊箱尺寸,从而进一步减少用钢量,节省施工成本。

(2) 区别于传统钢吊箱在整个底板上浇筑封底混凝土的满封底工艺,本项目钢吊箱在底板下方设置钢套管,封底混凝土浇筑在钢套管与钢护筒的间隙内,在保证黏结力满足结构受力要求的前提下,节省了封底混凝土用量。

(3) 为便于钢吊箱壁板周转,以及不干扰吊杆安装,将圈梁设计在钢吊箱外侧。钢吊箱主要承受外侧水压荷载,外侧水压力由环向圈梁、壁体竖肋、壁体水平肋及壁体面板形成的整体结构体系承担,然后由环向圈梁将荷载传递给内支撑结构。

3 施工重难点

钢吊箱围堰施工过程涉及钢吊箱运输、钢吊箱

散件吊装、钢吊箱下放及钢吊箱封底施工等工序。施工重难点总结如下:

(1) 围堰设计高水位时钢吊箱封底后,系梁施工作业时最大水头差达3 m,对钢吊箱结构要求高,施工安全风险高。

(2) 受栈桥和施工平台结构设计限制,无法使用大型运输及起重设备,钢吊箱只能采用后场分块加工、现场散拼、下放的方式施工,施工组织复杂,拼装下放安全风险高。

(3) 钢吊箱封底是采用向钢套管内灌注混凝土的方式进行的,区别于传统的底板满封工艺,其封底施工组织难度大,过程质量控制要求高。

(4) 桩系梁施工过程中,水上起重吊装作业多,施工不可控因素多,施工安全风险高。

4 施工关键技术

钢吊箱作为桩系梁施工的挡水与围护结构,本文主要对钢吊箱围堰施工进行研究。钢吊箱围堰主要施工步骤为:钢吊箱加工→钢吊箱组拼与下放→钢吊箱封底→体系转换。其中,钢吊箱围堰施工和下放系统安装现场如图6、7所示。



图6 钢吊箱围堰施工过程照片

Figure 6 Construction process of steel suspended box cofferdam



图7 钢吊箱下放系统安装

Figure 7 Installation of steel suspended box lowering system

4.1 钢吊箱加工

钢套管、钢底板、壁板、圈梁、内支撑、吊挂系统及其他附属结构均在后场加工成型。

钢吊箱加工过程中,除需把控焊缝焊接质量外,还需严控钢吊箱底板开孔质量,防止因孔位偏差过大影响后续钢吊箱下放施工。底板开孔前,应根据钢护筒实际偏位现场放样。以桩位理论中心为基准,现场在钢吊箱底板上放样。钢护筒顶口中心及钢吊箱底口高度对应钢护筒的中心,分别以顶底口圆心为中心放样顶口圆、底口圆,两圆的包络图相切后为底板开孔线包络线。

4.2 钢吊箱组拼与下放

钢吊箱组拼总体施工流程为:焊接临时拼装平台(用于底板吊装)→钢底板吊装(吊装前将底板与钢套管焊接成整体)→壁板及附属设施安装(以底板为拼装平台)。

钢吊箱下放总体施工流程为:下放系统安装→拧紧底螺母(底螺母与底锚垫板设置于千斤顶下方支撑体系内)→松开顶螺母(顶螺母和顶锚垫板设置于千斤顶上方支撑体系顶端)→顶螺母上移一个千斤顶油缸行程(此时整个体系重力主要由底螺母和底锚垫板承受)→起顶千斤顶(千斤顶向上顶升一个油缸行程)→拧紧顶螺母→松开底螺母(此时整个体系重力主要由顶螺母和顶锚垫板承受)→底螺母上移一个千斤顶油缸行程(便于吊杆下移)→千斤顶回油(此时千斤顶带着整个结构下放)→重复上述操作,直至下放至设计高程。

钢吊箱组拼与下放具体实施流程如下:

在每根钢护筒上对称焊接4个I40a托架作为钢吊箱组拼过程中的临时拼装平台。钢吊箱底板与钢套管焊接成整体后,吊装至临时拼装平台上,之后以底板为拼装平台依次完成壁板及其他附属结构的安装。

为保证封底混凝土质量,综合考虑重力、浮力及水流所产生的水平力作用,每个钢护筒处对称设置4根拉压杆,拉压杆一端与钢吊箱底板铰接,一端与钢护筒焊接,其铰接与固结相结合的方式有利于水平力作用下的钢吊箱稳定。拉压杆采用双拼槽I20a加工而成,双拼槽钢的间隙采用砂浆或其他防渗材料进行填充。钢吊箱下放前铰支座与底板同时安装,拉压杆与钢护筒之间的固定端待钢吊箱下放至设计

标高后现场施焊。

钢吊箱采用4台30 t千斤顶同步下放,吊挂梁搁置在顶端的钢护筒上,通过4根 $\phi 32$ mm精轧螺纹钢吊杆与钢吊箱底板相连接,主要依靠千斤顶、吊挂梁、底螺母、底锚垫板、顶螺母及顶锚垫板组成的下放系统,通过千斤顶油缸顶升与回油实现钢吊箱的整体下放,下放初始需拧紧底螺母,松开顶螺母,并使顶螺母上移一个油缸行程,此时主要由底螺母和底锚垫板承受整体重力,待油缸顶升至极限后,拧紧顶螺母,松开底螺母,并使底螺母上移一个油缸行程,此时油缸回油带着钢吊箱整体下放,至此完成一个下放步骤。如此循环,从而实现钢吊箱的逐步下放。下放过程中需保持千斤顶的同步性,防止钢吊箱发生倾覆及钢吊箱壁板局部出现变形。

4.3 钢吊箱封底

仅需在钢套管与钢护筒的间隙内浇筑封底混凝土,单个套管内的封底混凝土量约 4.5 m^3 。钢套管封板与钢护筒之间存在约3.8 cm的空隙,为确保封底混凝土不外漏,钢吊箱施工前,潜水员在水下用预先准备好的砂浆布肠袋,堵塞护筒与套管底部间隙,防止混凝土淌漏。封底混凝土采用导管法进行浇筑,经潜水员水下触探确认封底混凝土达到设计标高后,方可拔出导管。

4.4 体系转换

当封底混凝土强度达到设计强度时,关闭连通器,抽出钢吊箱内的水,同时监测吊箱的变形以及各点标高。抽完水后,核查钢吊箱是否存在局部渗漏,如存在,需对局部进行补焊或加焊钢板进行封堵。

为确保钢吊箱整体稳定性,凿除封底混凝土表面的浮浆,在钢套管与钢护筒之间的空隙中焊接6~8个劲板,加劲板沿圆周均匀布置。随后拆除吊挂系统、拉压杆、割除封底混凝土顶面以上的钢护筒,此时主要由浮力、重力及封底混凝土的黏结力实现整个结构体系的平衡。

5 结论

(1) 区别于传统钢吊箱在底板上浇筑封底混凝土的满封底施工工艺,本项目通过在钢吊箱底板下设计钢套管,实施过程中仅需在钢套管内浇筑封底混凝土,在保证结构受力满足要求的前提下,节省了约 83 m^3 封底混凝土量。钢套管的设置,减少了钢吊

箱壁板设计高度。在保证钢吊箱横向与纵向空间满足系梁施工要求的前提下,对钢吊箱尺寸进行合理优化,共节省了约10 t钢材投入量,节约了施工成本。

(2) 有限元分析结果表明:围堰下放与围堰工作两个工况下,钢吊箱围堰各结构受力均满足要求,说明钢吊箱围堰设计合理可行;通过设置拉压杆的方式,减小了钢吊箱受水流及波浪力的干扰,保证了封底混凝土质量;封底混凝土达到设计强度后,凿除表层浮浆在其顶面加焊劲板,增强了整个结构体系的稳定性。

(3) 水中桩系梁实施效果较为理想,表明该新型单壁钢吊箱围堰具有一定的推广应用价值。

参考文献:

References:

- [1] 程翔云. 桩柱式高桥墩屈曲稳定的理论分析及近似计算[J]. 公路, 2014, 59(10): 153-155.
CHENG Xiangyun. Theoretical analysis and approximate calculation of buckling stability of higher pile-column bridge piers[J]. Highway, 2014, 59(10): 153-155.
- [2] 戚瑞琨, 庄冬利, 肖汝诚. 桩柱式桥墩顺桥向计算长度系数的研究[J]. 中外公路, 2016, 36(2): 192-195.
QI Ruikun, ZHUANG Dongli, XIAO Rucheng. Study on length coefficient of pile-column pier along the bridge direction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(2): 192-195.
- [3] 刘腾飞, 叶爱君, 王晓伟. 土体约束对桩柱式桥墩塑性铰长度的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1490-1496.
LIU Tengfei, YE Aijun, WANG Xiaowei. Confinement effect of soil on plastic hinge length in extended pile-shafts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1490-1496.
- [4] 刘晓明, 李曦, 刘齐建, 等. 深厚软土区桩柱式桥墩临界荷载简化计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 92-98.
LIU Xiaoming, LI Xi, LIU Qijian, et al. Simplified calculation method for critical load of pile piers in deep soft soil regions[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(3): 92-98.
- [5] 万世成, 刘颖, 胡航, 等. 沱江特大桥钢板桩围堰及埋置式承台施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(6): 144-149.
WAN Shicheng, LIU Ying, HU Hang, et al. Key construction technology for steel sheet pile cofferdam and embedded pile cap of Tuojiang River Bridge[J]. Construction Technology, 2024, 53(6): 144-149.
- [6] 刘光兵, 伍伟军, 刘斌. 超长钢板桩在低桩承台基坑中的支护设计与应用[J]. 施工技术, 2018, 47(19): 78-81.
LIU Guangbing, WU Weijun, LIU Bin. Design and application of super long steel sheet pile in foundation excavation support of low pile cap[J]. Construction Technology, 2018, 47(19): 78-81.
- [7] 黄童, 张浩. 临近运营线的大型承台深基坑支护方案优化及应用[J]. 居舍, 2018(33): 80-81.
HUANG Tong, ZHANG Hao. Optimization and application of supporting scheme for deep foundation pit with large pile caps near operation line[J]. Ju She, 2018(33): 80-81.
- [8] 余勇, 覃兴旭. 厚淤泥层埋入式承台施工技术[J]. 施工技术, 2016, 45(22): 111-114.
YU Yong, QIN Xingxu. Construction technology of embedded platform in thick silt layer[J]. Construction Technology, 2016, 45(22): 111-114.
- [9] 杨威, 肖长华, 李程远. 钢板桩支护技术在赵家里特大桥深基坑支护中的应用[J]. 施工技术, 2014, 43(12): 65-68.
YANG Wei, XIAO Changhua, LI Chengyuan. Application of steel sheet pile in deep foundation excavation support of Zhaojiali Super-Large Bridge[J]. Construction Technology, 2014, 43(12): 65-68.
- [10] 林树奎, 李宁. 长周期波涌浪海域承台钢吊箱封底技术研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 139-143.
LIN Shukui, LI Ning. Research on bottom sealing technology of steel hanging box of pile cap in long-period wave area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 139-143.
- [11] 熊仕坤. 锁口吊箱围堰在Padma大桥施工的应用[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 184-188.
XIONG Shikun. Application of suspension box cofferdam with interlock to construction of Padma Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 184-188.
- [12] 张豪, 郑义, 韩庆雄. 三峡库区桥梁深水基础围堰施工技术[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 118-121.
ZHANG Hao, ZHENG Yi, HAN Qingxiong. Construction technology of deep water foundation cofferdam of bridge in Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 118-121.
- [13] 田杰. 秀山跨海大桥深水无覆盖层基础设计与施工[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 142-145.

- TIAN Jie. Design and construction of Xiushan Bridge foundation under deep water in No covering exposed bedrock[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):142-145.
- [14] 游新鹏,罗英.中马友谊大桥主桥承台钢吊箱施工阶段仿真分析[J].中外公路,2019,39(6):94-97.
- YOU Xinpeng, LUO Ying. Analysis on construction stages simulation of steel boxed cofferdam for the China-Maldives Friendship Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6):94-97.
- [15] 费志高.库区高水头单壁钢吊箱围堰设计与施工[J].公路,2022,67(3):193-198.
- FEI Zhigao. Design and construction of high-head single-walled steel box cofferdam in reservoir area[J]. Highway, 2022, 67(3):193-198.
- [16] 邓海,许宏伟,李勇.公路桥梁中双壁钢吊箱围堰的设计与受力分析[J].公路工程,2020,45(6):138-142, 160.
- DENG Hai, XU Hongwei, LI Yong. Design and construction of double wall steel box cofferdam in highway bridge[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 138-142, 160.
- [17] 王明慧,陈永亮,李开兰,等.大水位差下钢吊箱围堰封底混凝土厚度优化设计[J].世界桥梁,2020,48(5):6-10.
- WANG Minghui, CHEN Yongliang, LI Kailan, et al. Thickness optimization design for base-sealing concrete in steel box cofferdam under big water-level difference[J]. World Bridges, 2020, 48(5):6-10.
- [18] 翁方文.潮汐地区单壁钢吊箱围堰施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(6):21-25.
- WENG Fangwen. Key construction techniques for single-walled steel box cofferdam in tidal area[J]. World Bridges, 2019, 47(6):21-25.
- [19] 郑伟,黄剑飞,邓贵茂.大型哑铃形承台单壁钢吊箱施工关键技术[J].施工技术,2019,48(11):48-53.
- ZHENG Wei, HUANG Jianfei, DENG Guimao. Key construction technology of single-wall steel suspension box of large dumbbell-shaped cap[J]. Construction Technology, 2019, 48(11):48-53.
- [20] 李宁,杜松,王振,等.中马友谊大桥主桥深水基础临时结构设计及施工技术[J].桥梁建设,2023,53(4):147-154.
- LI Ning, DU Song, WANG Zhen, et al. Design of temporary structures in deepwater foundation construction of China-Maldives Friendship Bridge and construction techniques [J]. Bridge Construction, 2023, 53(4):147-154.