

深水硬质岩嵌入式承台无封底施工关键技术

曾健^{1,2,3},关小会^{1,2},郭志伟¹

(1.中交第二航务工程局有限公司,湖北武汉 430014;2.长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室,湖北武汉 430014;
3.交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心,湖北武汉 430014)

摘要:深水嵌入式承台基础施工中,需将泥面开挖至封底混凝土以下并对基底进行清理,以保证封底混凝土的高度和浇筑质量。对于地质条件良好的硬质岩,存在开挖困难、水下作业工期长、质量控制难、施工成本高等问题。该文依托重庆嘉华轨道专用桥主墩承台施工,采用理论分析、数值计算和工程实施验证相结合的方法,形成一种深水硬质岩嵌入式承台无封底施工技术。该施工技术,采用开挖墙体基槽并浇筑基槽混凝土的方式取代大体积封底混凝土,达到为承台施工提供干作业环境的目的,可将承台范围内基坑开挖由水下作业转为干作业,缩短水下开挖作业工期,节约水下混凝土用量,提高施工质量和施工效率,降低施工成本。

关键词:承台;深水硬质岩;双壁钢围堰;无封底;基槽;渗透水

中图分类号:U443.25

文献标志码:A

Key Construction Techniques for Emended Cap Unsealed Bottom of Deep-Water Hard Rock

ZENG Jian^{1,2,3}, GUAN Xiaohui^{1,2}, GUO Zhiwei¹

(1.CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430014, China; 2.Transportation Industry Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology, Wuhan Hubei 430014, China; 3.Research and Development Center of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Industry Infrastructure, Wuhan, Hubei 430014, China)

Abstract: In the construction of a deep-water embedded cap foundation, it was required to excavate the mud surface to the depth below sealing concrete and clean the bottom carefully, ensuring the height and quality of bottoming concrete. For hard rock under good geological conditions, there exist such problems as difficulty in excavation, long excavation time consumption, and high construction cost. Based on the construction of the main pier caps of the Chongqing Jiahua Metro Bridge, this paper adopted the method of combining theoretical analysis, numerical calculation, and engineering implementation verification, which developed an emended cap unsealed bottom key construction techniques for deep-water hard rock. This construction technology used the method of excavating the wall foundation groove and pouring the foundation groove concrete to replace the large volume of bottom-sealing concrete as a way to achieve the purpose of providing a dry working environment for the construction of the cap. With this method, shorter underwater excavation time, reduced underwater concrete amount, improved construction efficiency, lowered construction time and are achieved.

Keywords: cap; deep-water hard rock; double-wall steel cofferdam; unsealed bottom; foundation trench; permeate water

0 引言

在目前的桥梁建设项目中,深水硬质岩嵌入式承台一般采用钢围堰施工^[1-3]。钢围堰作为承台基础施工时的挡水和模板结构,主要功能是防止水进入承台作业区,为承台施工提供一种干作业环境。钢围堰施工主要采用浇筑封底混凝土的方式阻止水从底部涌入承台作业区,同时为承台施工提供平台支撑;为满足抗浮、抗沉及自身强度要求,封底混凝土厚度必须符合相关要求^[4-6]。在嵌入式承台基础施工中,需将泥面开挖至封底混凝土以下并对基底进行清理,以保证封底混凝土的高度和浇筑质量。对于深水硬质岩嵌入式承台,封底混凝土较厚,存在开挖困难、开挖工期长、施工成本高等问题^[7-9]。鉴于此现

状,本文提出一种开挖壁体基槽并浇筑基槽混凝土的无封底混凝土施工技术。

1 工程概况

重庆嘉华轨道专用桥位于重庆嘉陵江上,原嘉华大桥上游 80 m,南接渝中区,北至江北区,全长 618.915 m。桥跨布置为(38+39+48+138+252+110)m,如图 1 所示。采用刚构-连续组合梁桥(跨中钢箱梁),桥宽 12.5 m,梁高变化为 5.0~15.7 m。主墩承台位于嘉陵江主航道两侧,桥墩桩基采用 9 根直径为 3.0 m 的钻孔灌注桩,平面布置为 3 排,每排 3 根,承台尺寸为 18 m×18 m×6 m,南侧承台顶标高 158.730 m,北侧承台顶标高 166.468 m,本文所述主墩承台均为南侧承台。

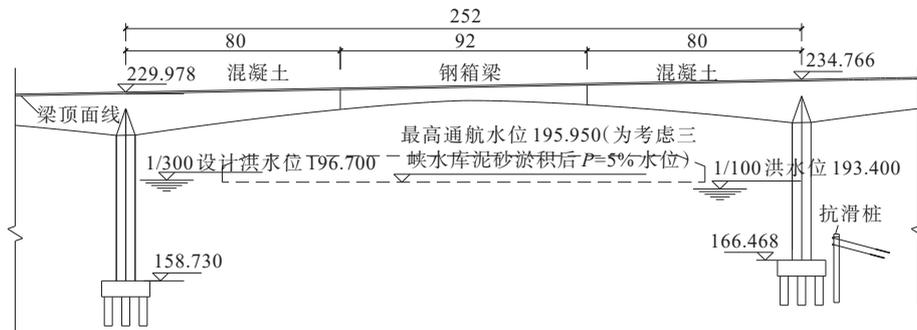


图 1 桥型布置图(单位:m)

Figure 1 Bridge layout(unit:m)

项目难点:①该地区降水量丰富,具有山区性河流特性,水位变化大,设计抽水水头 23.27 m,单壁钢围堰不能满足受力要求;同时,承台嵌入硬质岩层,插打钢板桩困难;②设计流速 2.5 m/s,横向荷载较大,不适合采用先围堰后桩基的施工工艺;③主墩承台距原嘉华大桥过近,不能水下爆破施工;开挖区岩层强度大,开挖难度大;④采用传统的封底混凝土施工工艺,经初步计算需要 4 m 厚封底混凝土方能满足抗浮要求^[10-12],封底混凝土区域岩层开挖量大、水下开挖工期长。

2 围堰方案比选

对于深水硬质岩施工围堰,采用双壁钢围堰的结构形式可避免钢板桩、钢管桩围堰插打困难、锁扣质量不易保证、易漏水等问题。传统的双壁钢围堰

采用封底混凝土配合施工。结合本工程特点,对传统封底施工技术和本文提出的无封底施工技术进行比选(表 1)。

3 总体方案设计

3.1 围堰总体结构布置

钢围堰壁体采用双壁结构,内轮廓尺寸为承台尺寸外扩 250 mm,即 18.5 m×18.5 m,外轮廓尺寸为 22.5 m×22.5 m,围堰壁体厚 2.0 m,壁体总高度 28.5 m,竖向分 4 节拼装(从底往上 7.5 m+6.0 m+7.5 m+7.5 m),在围堰内设置 4 层钢管撑。内支撑采用 $\phi 800$ mm×10 mm、 $\phi 1\ 000$ mm×10 mm 两种型号,其余构件组成见表 2。封槽混凝土底高程位于承台底以下 4.25 m,顶部与承台底标高齐平,槽宽 3.4 m。钢围堰结构布置如图 2 所示。

表1 施工技术对比

Table 1 Comparison of construction techniques

施工技术	工作机理	施工工艺	优点	缺点	备注
传统封底施工技术	由符合受力要求的封底混凝土与钢围堰壁体、钢护筒黏结成整体,阻止水从底部涌入承台作业区	开挖基坑→下放钢围堰→浇筑封底混凝土→抽水→浇筑承台混凝土	施工工艺成熟	硬质岩强度高,开挖困难。需将泥面开挖至封底混凝土底标高以下,基坑开挖量大,且均为水下开挖,施工效率低,施工工期长。深水深埋承台基础封底混凝土较厚,水下混凝土用量大	备选
无封底施工技术	通过浇筑基槽混凝土将钢围堰植入硬质岩内,阻止水从侧壁涌入承台作业区;采用明排水排除少量从底部渗入承台作业区的水	开挖基槽→下放钢围堰→浇筑基槽混凝土→抽水→开挖基坑至承台底标高→浇筑承台混凝土	有效利用硬质岩地质渗透系数小,岩石强度高的优势。基槽开挖量小,水下混凝土用量小,成本低。承台区基坑开挖为干施工,施工效率高	岩层渗透系数难以确定,渗透水量与理论计算值会存在较大偏差	选用

表2 围堰构件组成

Table 2 Cofferdam component composition

构件	壁板/mm	纵向次梁/(mm×mm×mm)	环板厚度/mm	水平横撑/(mm×mm)
A节(7.5 m)	8	L75×50×6	12	L110×8
B节(6.0 m)		L80×50×6	12,16,20	2L110×8/2L100×8/L110×8
C节(7.5 m)		L80×50×6	12,16	2L100×8/2L90×8
D节(7.5 m)		L75×50×6	10,12	2L90×8/L100×8

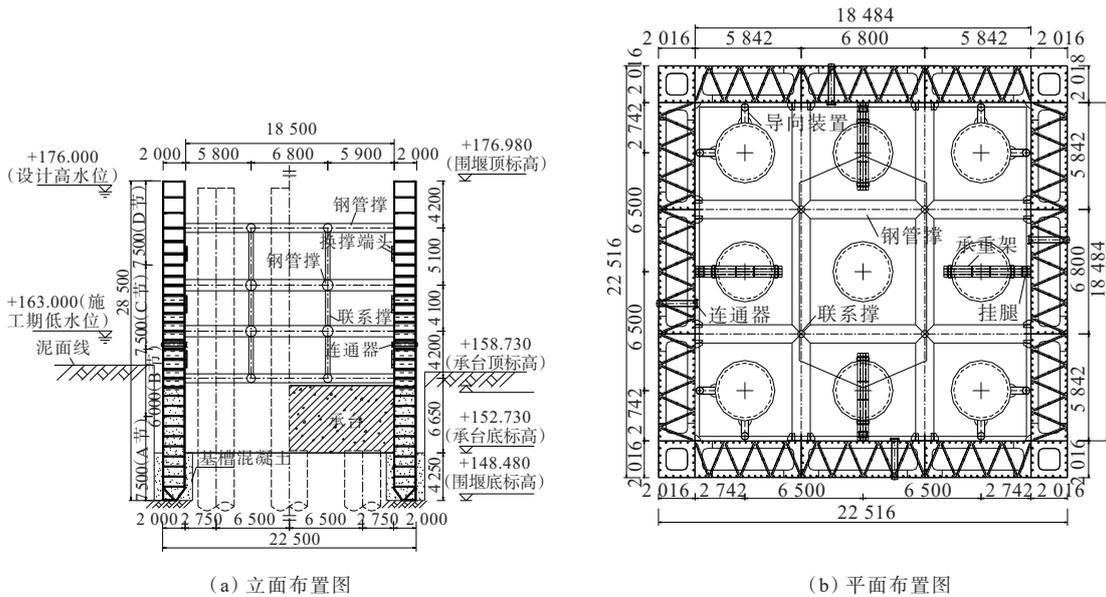


图2 钢围堰布置图(单位:mm)

Figure 2 Steel cofferdam layout (Unit: mm)

3.2 基坑渗透水量计算与处理

根据《建筑施工计算手册》深井(坑)、沉井渗透水量计算公式计算基坑渗透水量^[13]。

$$Q = K \cdot A \cdot i \quad (1)$$

$$i = \frac{h'}{h' + 2t} \quad (2)$$

式中:Q为单位时间内的渗透水量(m³/d);K为土的渗透系数(m/d);A为水渗流的截面面积(m²);i为水力坡度,即高水位与低水位之差与渗透距离之比;h'为水头差(m);t为围护结构插入坑底深度(m)。

根据地质资料及结构布置情况,渗透系数K为0.087 m/d,渗流截面面积A=17.2²=295.84 m²,水

头差 $h' = 176 - 152.73 = 23.27$ m, 围护结构插入坑底深度 $t = 4.25$ m. 将各参数取值代入式(1), 计算得基坑渗透水量 $Q = 18.85 \text{ m}^3/\text{d}$.

通过计算可知, 在最高设计水位时, 单位时间内基坑渗透水量较小. 为保证基坑内承台施工的干作业环境, 采用明排降水排除基坑内少量渗透水.

3.3 整体模型计算

为确保钢围堰在各个施工阶段结构的安全性, 充分考虑施工过程中结构的不同受力情况, 主要计算以下6种工况: ① 下放到位工况; ② 抽水工况; ③ 浇筑墩身拆第4道撑工况; ④ 浇筑墩身换第3道撑工况; ⑤ 浇筑墩身换第2道撑工况; ⑥ 浇筑墩身换第1道撑工况. 主要荷载: 结构自重、风荷载、水流力、静水压力、混凝土侧压力等. 各工况需根据所处环境按照最不利受力原则进行选择组合. 工况①、工况⑥荷载简图如图3所示.

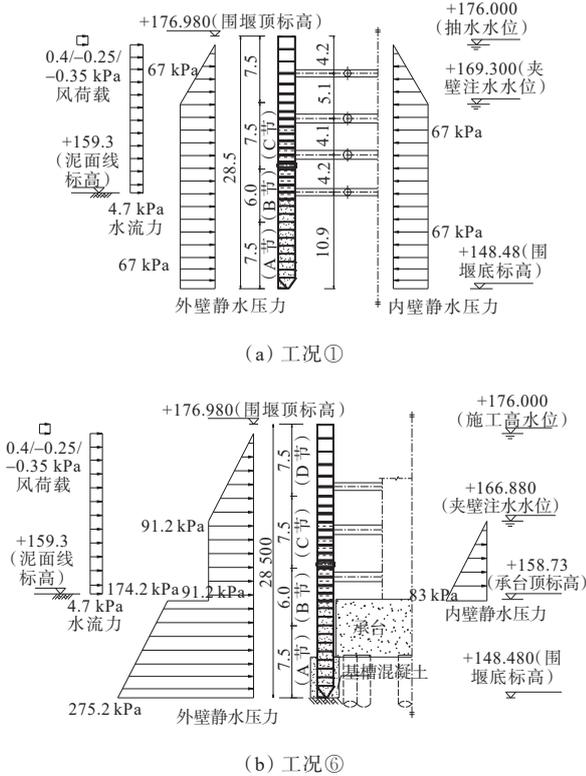


图3 不同工况下荷载简图(尺寸单位:m)

Figure 3 Load diagram under different working conditions (unit of size:m)

钢围堰结构采用有限元分析软件进行整体模型计算. 各构件采用的单元类型如表3所示.

模型中 X、Y、Z 方向分别为横桥向、高度方向、顺桥向. 计算模型如图4所示.

不同工况下模型计算位移云图如图5所示.

表3 模型单元类型

Table 3 Model element types

构件名称	单元类型
壁板、隔舱板	Shell 63
纵向次梁、环板、水平横撑等	Beam 188
钢管撑	Beam 188
夹壁混凝土	Solid 45

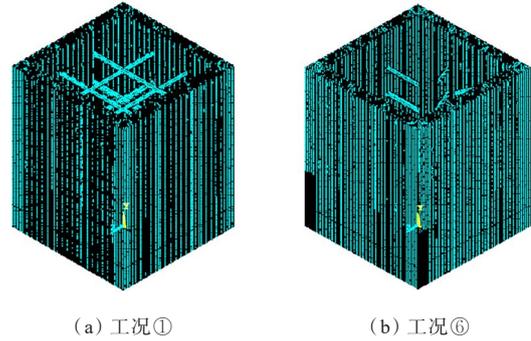


图4 不同工况下模型图

Figure 4 Models under different working conditions

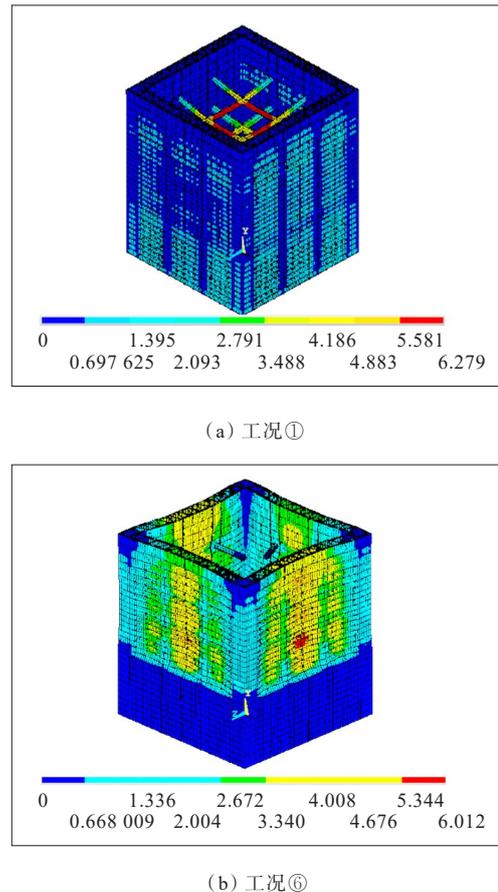


图5 不同工况下围堰整体变形图(SUM)(单位:mm)

Figure 5 Overall deformation of cofferdam under different working conditions (SUM) (Unit: mm)

整体模型计算结果汇总如表4所示。

表4 整体模型计算结果汇总

Table 4 Summary of calculation results of overall model

工况	组合应力/ MPa	强度设计值/ MPa	最大变形/ mm	安全性
①	141	215	6.3	安全
②	168	215	8.0	安全
③	181	215	7.0	安全
④	167	215	7.3	安全
⑤	157	215	7.0	安全
⑥	153	215	6.0	安全

3.4 围堰抗倾覆计算

考虑在施工高水位下,钢围堰下沉到位并完成夹壁混凝土浇筑时围堰的安全性,对围堰进行整体抗倾验算。

围堰自重: $P_1=12\ 000\ \text{kN}$ (方向: \downarrow),夹壁混凝土自重: $P_2=39\ 070\ \text{kN}$ (方向: \downarrow),夹壁内水荷载: $P_3=13\ 612\ \text{kN}$ (方向: \downarrow),浮托力: $P_4=44\ 723\ \text{kN}$ (方向: \uparrow),水流力荷载: $P_5=1\ 766\ \text{kN}$ (方向: \rightarrow),抗倾系数: $\alpha=\text{抗倾覆力矩}/\text{倾覆力矩}=6.6>1.5$,因此围堰抗倾覆满足要求。

4 主要施工流程

先搭设拼装平台,利用工程钻机、冲击钻在钢围堰正下方河床上钻孔或冲击成槽,再利用浮吊在平台上拼装钢围堰,拼装完成经检验合格后进行下放、下沉^[14]。围堰下沉到位后水下浇筑封槽混凝土及夹壁混凝土,将围堰锚固在河床上^[15]。待封槽混凝土强度满足要求后抽水、挖除承台范围内岩层,绑扎承台钢筋,浇筑承台混凝土^[16-17]。承台混凝土达到设计强度后,在满足施工操作空间的要求下,逐层拆除钢管撑及其相连竖向联系撑,绑扎墩身钢筋,逐层施工墩身。

5 施工关键技术

5.1 基槽开挖

围堰基槽采用工程钻机和冲击锤冲击钻机进行取芯成槽,并采用气举反循环设备将槽内碎渣抽渣清理。由于围堰掏槽整体工期较长,围堰基槽初步形成后为防止江底砂卵石在水流冲击作用下回淤至围堰基槽内,围堰基槽施工前须沿钻孔平台四周最

外侧设置石笼网箱。待冲击钻第一轮掏槽完成后,采用特制圆柱锤将孔与孔之间的剩余岩石冲碎成槽,利用空压机抽渣、吸出的碎渣堆放在渣船上并外运至渣土场^[13]。清槽完成后需使用验槽器进行验槽,以确保围堰下放一次性到位。

5.2 围堰下放

围堰整体重量较重,且距原嘉华大桥过近,整体浮运易发生危险,故通过搭设拼装平台,使用驳船将围堰分块运至墩位,浮吊分块吊运至拼装平台上进行拼装,千斤顶整体下放的施工工艺。钢围堰应选择风平浪静的气象条件下进行下放。下放牛腿须在底板围堰加工时一起制作。围堰拼装完成后,须检查围堰分块拼接缝处焊接质量,检验焊缝密封性。安装并调试下放系统。保证下放吊杆垂直,若吊杆采用精轧螺纹钢,须设置悬臂端稳固措施,防止吊杆受弯受剪。围堰拼装及下放过程中,连通器一直保持打开状态。

5.3 水下混凝土浇筑

围堰下放到位后,保持壁体内外连通器为打开状态,围堰内对称水下浇筑夹壁混凝土10.1 m,同时对称水下浇筑基槽混凝土4.25 m。基槽混凝土采用斜面推进法浇筑,从下游端开始向上游端推进。在浇筑过程中,要严格控制水下混凝土坍落度与和易性,执行连续不间断、及时补料供料、导管底口有效埋深等技术措施,保障封槽混凝土浇筑质量^[18]。在浇注后期,测量人员应加强测量频次,如实提供混凝土顶面高程数据,适时增加混凝土的坍落度,保证基槽顶面的平整度^[19]。

5.4 围堰内抽水

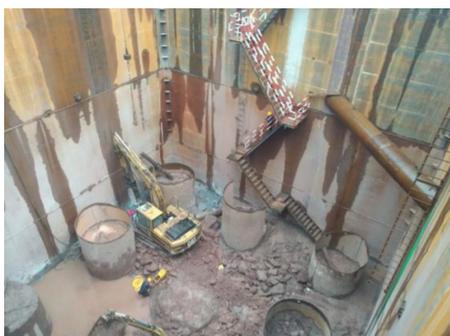
基槽混凝土达到设计强度后,关闭连通器,围堰内及夹壁内同步抽水。围堰夹壁内实际注水标高控制原则为:(围堰外水位-夹壁内水位)-(夹壁内水位-围堰内水位) $\leq 0.5\ \text{m}$ 。围堰抽水时,应观察壁体的变形情况,如发生异常,应立即停止抽水。围堰内抽水后,实时观测渗透水量,渗透水量不大时可采取明排降水。实际施工中,若岩层裂隙较为发育,岩层实际渗透系数大于勘察试验结果,渗透水量较大,可采用水下注浆方式封堵裂隙降低渗透系数后再降水^[20]。

本项目在抽水及承台范围基坑开挖期水位较低。为满足施工空间要求,在确保施工安全的前提下,将原第1~4层内支撑变更为角撑,采用后安装工

艺。现场施工见图6。



(a) 围堰内抽水图



(b) 围堰内承台范围基坑开挖图

图6 现场施工情况

Figure 6 Site construction situation

5.5 承台及墩身施工

抽水完成后,在围堰内侧安装扶梯,割除钢护筒及导向装置,开挖围堰内侧泥面至承台底标高,清理桩头、平整底面,绑扎钢筋,逐层浇筑承台及墩身混凝土。

6 结语

嘉陵江重庆嘉华轨道专用桥主墩承台施工采用双壁钢围堰无封底混凝土施工工艺,通过开挖围堰壁体基槽、浇筑基槽混凝土,将钢围堰和硬质岩基础黏结紧密;采用明排降水排除少量渗透水,为承台施工提供干作业环境。该方法采用少量基槽混凝土取代大体积封底混凝土,有效利用渗透系数小、岩石强度高的优势,与传统的封底混凝土施工工艺相比,减少岩体开挖量 $1\,313\text{ m}^3$,节约混凝土使用量 567 m^3 。可为同类型深水硬质岩嵌入式承台施工提供借鉴。

参考文献:

References:

[1] 王德怀.深埋式承台钢板桩围堰设计与施工关键技术

[J].中外公路,2021,41(3):130-134.

WANG Dehui. Key technology of design and construction of steel sheet pile cofferdam for deep buried pile cap[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):130-134.

[2] 丁巍,张娟.超大哑铃形首节双壁钢围堰施工技术[J].中外公路,2019,39(1):105-108.

DING Wei,ZHANG Juan.Construction technology of first section of super dumbbell-shape double-wall steel cofferdam[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):105-108.

[3] 王超,陈诚,曾瑞祥.深水航道区域大型双壁钢围堰拆除施工技术[J].中外公路,2021,41(6):171-173.

WANG Chao, CHEN Cheng, ZENG Rui-xiang. Construction technology of large double-wall steel cofferdam demolition in deep water channel area[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):177-173.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢围堰工程技术标准:GB/T 51295—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard of steel cofferdam engineering: GB/T 51295—2018[S]. Beijing: China Planning Press,2018.

[5] 赫宏伟.黄河机场特大桥基础钢板桩围堰水下封底混凝土设计及施工[J].中外公路,2019,39(1):121-125.

HE Hongwei.Design and construction of foundation steel sheet pile cofferdam bottom sealing with underwater concrete for the grand bridge of Yellow River airport[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):121-125.

[6] 杨定军.挪威贝特斯塔大桥斜桩承台钢围堰设计与施工[J].中外公路,2023,43(3):163-170.

YANG Dingjun.Design and construction of steel caisson for inclined pilecap of beitstadsund bridge in norway[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):163-170.

[7] 李世楨.无封底钢吊箱围堰施工技术研究[J].建材与装饰,2019(34):56-57.

LI Shizhen.Study on construction technology of steel box cofferdam without back cover[J].Construction Materials & Decoration,2019(34):56-57.

[8] 胡海波,周亚栋,张晶.武汉青山长江公路大桥北主墩钢围堰封底关键技术[J].桥梁建设,2021,51(1):8-13.

HU Haibo,ZHOU Yadong,ZHANG Jing.Key base sealing techniques for north main pier steel cofferdam of Qingshan Changjiang River highway bridge in Wuhan[J].

- Bridge Construction,2021,51(1):8-13.
- [9] 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.
- [10] 闫志刚.沪通长江大桥天生港专用航道桥3号主墩钢围堰封底技术[J].桥梁建设,2015,45(6):89-94.
YAN Zhigang. Techniques of steel cofferdam base sealing for main pier No.3 of Tiansheng Port special ship channel bridge of Hutong Changjiang River bridge[J]. Bridge Construction,2015,45(6):89-94.
- [11] 甘采华,宁怡豪.钢板桩围堰封底混凝土厚度优化设计分析[J].西部交通科技,2021(12):64-67.
GAN Caihua, NING Yihao. Optimal design and analysis of concrete thickness for back cover of steel sheet pile cofferdam[J]. Western China Communications Science & Technology, 2021(12): 64-67.
- [12] 王达,严伟飞,刘旺,等.黄河上游超大型双壁钢围堰结构受力分析[J].公路与汽运,2021(4):135-139,145.
WANG Da, YAN Weifei, LIU Wang, et al. Mechanical analysis of super-large double-walled steel cofferdam structure in the upper reaches of the Yellow River[J]. Highways & Automotive Applications, 2021(4): 135-139, 145.
- [13] 石九州,任毅,叶亦盛,等.罗家湾大桥深水薄覆盖层主墩基础施工技术[J].施工技术,2017,46(20):54-57.
SHI Jiuzhou, REN Yi, YE Yisheng, et al. Construction technology of main pier foundation for deepwater thin overburden in Luojiawan bridge[J]. Construction Technology,2017,46(20):54-57.
- [14] 殷敏来.无底双壁钢套箱围堰封底混凝土施工工艺及仿真分析[J].交通科技,2011(4):18-20.
YIN Minlai. Construction technology and simulation analysis of bottom sealing concrete for bottomless double-walled steel boxed cofferdam[J]. Transportation Science & Technology,2011(4):18-20.
- [15] 江正荣.建筑施工计算手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
JIANG Zhengrong. Handbook of building construction calculation[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2018.
- [16] 尹禄修.复杂地质条件下大型双壁钢围堰施工技术探究[J].铁道建筑技术,2018(3):57-61.
YIN Luxiu. Key technology research of large double-wall steel cofferdam in complex geological conditions[J]. Railway Construction Technology,2018(3):57-61.
- [17] 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.
- [18] 吴玲正.深中通道东泄洪区非通航孔桥围堰设计与施工[J].世界桥梁,2020,48(5):21-25.
WU Lingzheng. Design and construction of cofferdams for non-navigational channel bridge of Shenzhen-Zhongshan link in east flood discharge area[J]. World Bridges,2020,48(5):21-25.
- [19] 丁文在,黄大寨.扬州京杭运河特大桥主墩基础围堰施工[J].西部探矿工程,2007,19(1):152-153.
DING Wenzai, HUANG Dazhai. Cofferdam construction of main pier foundation of Yangzhou Jinghang canal bridge [J]. West-China Exploration Engineering, 2007, 19(1): 152-153.
- [20] 周杰,黄宇.无封底无帷幕深水浅岩钢板桩围堰全封闭施工技术[J].施工技术,2017,46(19):81-83.
ZHOU Jie, HUANG Yu. Fully closed construction technology of steel sheet pile cofferdam with shallow bedrock and deep water condition[J]. Construction Technology,2017,46(19):81-83.