

DOI: 10.7672/sgjs2025070118

砂卵石填充条件下类喀斯特地貌河床埋置 承台围堰施工关键技术*

唐栋梁, 阮泽莲, 曹鑫林

(中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401120)

[摘要] 泸州市榕山长江大桥2号主墩处河床地貌奇特, 呈现凸石、沟槽、卵石填充等“类喀斯特”地貌特点, 在此地质条件下进行埋置承台施工尚无先例。针对项目特点, 提出了套管旋挖钻引孔、钢板桩嵌岩、砂泥混合物填充止水成套施工技术, 成功解决了“类喀斯特”地貌河床等复杂地质条件下埋置承台围堰成槽开挖及围堰止水施工难题。详细介绍了该埋置承台围堰结构设计以及施工过程中的引孔、止水、开挖等关键技术。

[关键词] 桥梁工程; 类喀斯特; 承台; 钢板桩; 围堰; 施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0118-05

Key Construction Technology of Buried Pile-cap Cofferdam Under Karst-like Landform Riverbed Filled with Sand and Gravel

TANG Dongliang, RUAN Zelian, CAO Xinlin

(China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The riverbed landform at the No. 2 main pier of the Rongshan Yangtze River Bridge in Luzhou City is unique, showing karst-like landform characteristics such as convex stone, groove, and pebble filling, etc. There is no precedent for the construction of embedded caps under this geological condition. According to the characteristics of the project, a complete set of construction technology of casing rotary drilling guiding hole, steel sheet pile rock embedding, sand-mud mixture filling and water-stopping is proposed, which successfully solves the problems of trench excavation and cofferdam water-stopping construction of buried cap cofferdam under complex geological conditions of “karst-like” landform riverbed. The structural design of the buried pile cap cofferdam and the key technologies, such as guiding holes, water stopping, excavation in the construction process are introduced in detail.

Keywords: bridges; karst-like; pile cap; steel sheet pile; cofferdam; construction

1 工程概况

榕山长江大桥位于四川省泸州市合江县, 跨江主桥长1 055m, 为高低双塔、双索面、四跨连续叠合梁、半漂浮体系斜拉桥, 孔跨具体布置为200m+530m+245m+80m。由于行洪需要, 水中墩均设计为埋置承台, 其中南岸2号主墩的埋置承台平面尺寸23m×29m, 承台厚度5m, 该承台采用先成桩后围堰的工艺施工。

由于长江水流长期冲蚀, 大桥2号墩墩位处形成多条纵向沟槽, 深浅不一, 沟槽内分层填满砂夹卵石, 卵石层松散、自稳性较差, 最大卵石层厚度超过10m(见图1)。此外, 墩位处存在大量凸石、倾斜岩面, 岩石强度总体较大且软硬不均, 强度普遍超过70MPa, 最大约140MPa。

2 埋置承台施工方案比选

墩位处存在大量凸石、沟槽及卵石填充等复杂地质, 埋置承台侧面及底面存在大量透水通道, 因此, 承台侧面必须设置围堰用于止水, 且围堰刃脚必须位于承台底面以下并穿过卵石层嵌入岩石中。基于上述地质条件, 本埋置承台施工围堰可考虑为双壁钢吊箱或单壁钢板桩围堰。

* 中交二航局科技立项: 山区河流深厚卵石填充条件下的沟槽式河床埋置承台施工工艺研究

[作者简介] 唐栋梁, 高级工程师, 项目总工程师, E-mail: 195407395@qq.com

[收稿日期] 2024-12-10



图 1 大桥 2 号墩河床呈现“类喀斯特”地貌

Fig. 1 The riverbed of pier 2 of the bridge presents “karst-like” landform

2.1 双壁钢吊箱方案

设计为等高无底夹壁钢吊箱,夹壁厚度 1m,围堰外边长 34.4m、宽 25.4m、高 15m,双壁吊箱顶标高 210.400m、底标高 195.400m (低于承台底 1.6m),夹壁混凝土浇至河床面,双壁钢吊箱顶预留 2m 高单壁围堰渡洪,单壁顶标高可达 212.400m(见图 2)。双壁钢吊箱四周岩面高低错落、深浅不一,为保证止水效果,要求承台四周引孔均嵌入硬岩一定深度。引孔过程中为防止卵石层坍塌,需对围堰四周一定范围内的砂卵石层注浆加固。

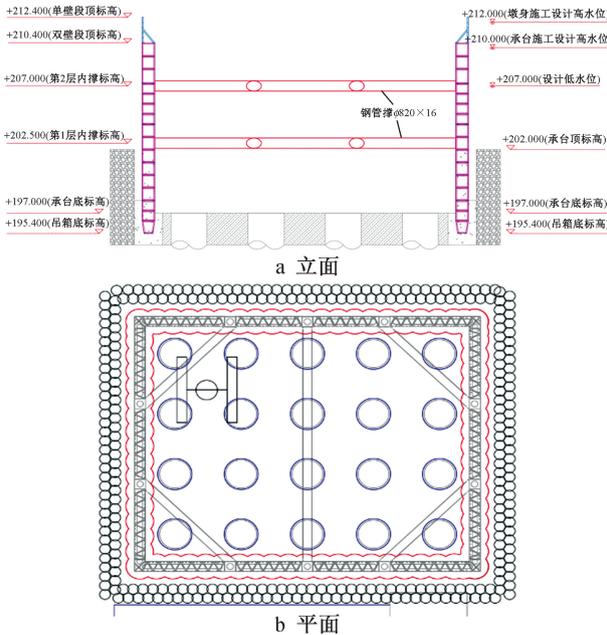


图 2 双壁钢吊箱布置

Fig. 2 Layout of double-wall steel hanging box

2.2 钢板桩围堰方案

钢板桩围堰方案设计采用 PU600×210 型钢板桩,材质为 SY390,围堰平面尺寸为 30m×24m,承台施工期水位 206.000m,围堰设计顶标高 211.000m。围堰四周引孔深度高低错落,引孔底应低于承台底不小于 3m,且需嵌入硬岩一定深度(见图 3)。

2.3 施工方案(见表 1)

通过对上述两种方案的优缺点进行比较,双壁钢吊箱方案存在的卵石层坍塌问题目前未找到彻

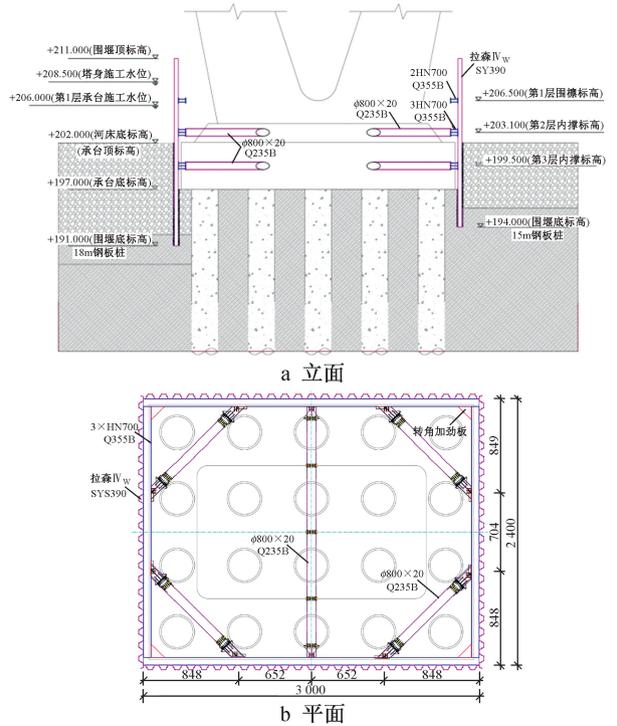


图 3 钢板桩围堰布置

Fig. 3 Layout of steel sheet pile cofferdam

表 1 施工方案比选

Table 1 Comparison and selection of construction scheme

施工方案	优点	缺点
双壁钢吊箱方案	1) 刚度大; 2) 抗洪能力强; 3) 利于渡洪	1) 对引孔线形精度要求高; 2) 由于砂卵石孔隙率较大,压力注浆时浆液将从孔隙率较大的薄弱处流失,导致注浆加固效果欠佳,旋喷注浆因卵石粒径较大,会影响旋喷注浆效果,难以达到预期目的,因此,卵石坍塌问题仍无法有效解决; 3) 由于注浆加固效果无法保证,引孔过程中,卵石坍塌风险高,易导致埋钻事故; 4) 围堰下放过程中,扰动孔周卵石将导致其坍塌,钢吊箱无法继续下放; 5) 成本高,经济性差
钢板桩围堰方案	1) 经济性好; 2) 施工较方便; 3) 对引孔线形要求较低	1) 旋挖引孔过程中及引孔完成后河床卵石层存在坍塌风险; 2) 引孔垂直度不够或咬合搭接量较小,导致孔底未连续咬合成槽,围堰下放到不到位; 3) 围堰底口刃脚及侧壁存在透水通道,导致围堰漏水

底的解决方案,技术及安全风险不可控;钢板桩围堰方案中存在的问题可通过以下方式较好解决。

1) 针对旋挖引孔过程中及引孔完成后河床卵石层的坍塌问题,采用在旋挖钻钻杆外增设护套管形成套管旋挖钻,引孔过程中护套管可防止卵石坍塌;引孔完毕后套管拔除前,在孔内填砂可防止卵石坍塌。

2) 针对引孔垂直度不够和无咬合问题,需要控制以下3个因素:①控制引孔孔位的平面位置,可以通过设置定位标尺、标记点及定位架等措施实现;②控制咬合孔间的搭接宽度,可以通过适度增加搭接宽度的方式实现;③控制好引孔垂直度,旋挖钻外套管为刚性套管、变形小,本身利于垂直度控制,钻进过程中控制钻压,在倾斜岩面采用低压慢钻的方式钻进,施工中勤量测、及时纠偏。

3) 针对围堰底口和侧壁透水通道漏水问题,套管旋挖钻引孔完毕后,孔内先填泥(黏土),并用旋挖钻钻头捣碎,搅拌均匀形成泥浆,再采用挖机在孔内填砂,形成均匀的砂泥混合料,其中泥浆填充于砂粒空隙中起到胶凝粘接作用,振动锤施沉钢板桩时液化细砂并板结砂泥混合料使填料密实。此外,备用高压旋喷注浆加固砂泥方案,可很好解决围堰止水问题。

因此,选择钢板桩围堰作为实施方案。

3 钢板桩围堰结构设计研究

3.1 砂泥混合填料对钢板桩的侧压力影响研究

砂泥混合填料不仅有良好的防渗止水效果,其类似黏性土的土力学特性还能有效降低作用在钢板桩上的主动土压力。钢板桩刚度较小、柔度较大,在承台内外水头差较大时需要设置强而密的支撑。然而,这种支撑会对后续的承台及墩身施工造成很大干扰。上述承台围堰方案中,在锁口钢板桩围堰施工期间,内外水头差超过9m,按照卵石层验算设计需要设置3层内支撑,并进行多次支撑转换,这将导致承台施工工期延长,甚至在洪水到来前无法完成出水任务。

在土力学计算理论中,纯砂孔隙比相对较大、透水性较强,因此对板桩的侧压力按水土分算的思路进行计算,而纯黏土因透水性较差,因此对板桩的侧压力按水土合算思路进行计算。砂泥混合填料采用水土分算理论计算侧压力时,则侧压力过大,内支撑设置过强不利于抢水施工;采用水土合算理论计算侧压力时,则侧压力过小,内支撑设置过弱偏于不安全。因此,有必要对砂泥混合填料的透水性展开试验研究,以确定侧压力计算时的参数取值。在围堰上方设置丁坝拦水,水流对围堰只产生静水压力,不考虑水流冲击力。

根据朗金土压力理论,水土分算时,孔底最大水土压强为141kPa;水土合算时,孔底最大水土压强为51kPa。为确定参数取值,在施工现场进行砂泥混合料振动板结试验,泥浆密度 $1.08\text{g}/\text{cm}^3$ 。试验表明,砂泥混合料振动板结后成型效果较好,密

实度较高,透水性较差。

根据试验情况,实际模型更趋向于水土合算模型,但偏于安全考虑,混合填料中考虑一定渗透水压力,渗透水压力取值按水土分算模型中水压力的30%考虑。

混合填料考虑渗透水时,孔底最大水土压强为91kPa,较水土分算压强有明显降低,但比水土合算更偏于安全。

3.2 钢板桩施沉振动锤选型与打入深度研究

3.2.1 围堰周围卵石层厚度

为获取围堰位置处卵石层厚度,施工前采用地质雷达对围堰区域卵石层厚度进行扫描(见图4),其结果与承台四周工程桩采用旋挖钻机取芯得到的卵石层厚度数据有较明显差异。由于工程桩钻孔涵盖整个围堰四周,芯样为实际取样,能够更真实反映围堰周边地质实际情况,因此,卵石层厚度以工程桩取芯数据作参考。

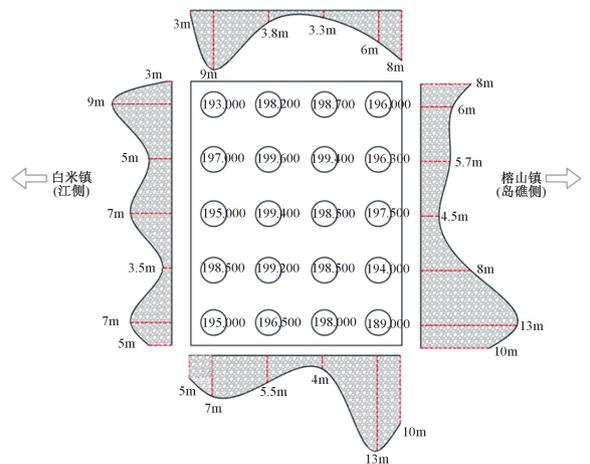


图4 承台周边工程桩位置卵石层厚度分布

Fig. 4 Thickness distribution of pebble layer at pile location around cap

在图4中,桩孔处数据为旋挖钻钻孔实测岩面标高,河床标高为+202.000m,其差值即为桩孔附近卵石层大致厚度,由此可见,围堰周围的卵石层覆盖厚度约在3~13m。

3.2.2 插板机选型

卵石覆盖层最大深度13m,钢板桩入岩考虑为2m,则板桩插入砂泥混合物最大设计深度为15m。钢板桩采用PU600×210,单根钢板桩周长205cm。饱和砂土与钢板桩的摩擦力按 $20\text{kN}/\text{m}^2$ 考虑,砂的液化系数取0.3,钢板桩咬合摩阻力取砂土摩阻力的20%,则单根钢板桩打入需要克服的总摩阻力为221.4kN。

通过上述计算并考虑一定安全储备后,选择激

振力不小于 500kN 的插板机能够满足钢板桩打入 15m 的深度要求。

3.3 钢板桩围堰结构设计

板桩侧压力按照渗透水压法进行计算,即混合填料中的渗透水压力取值按水土分算模型中水压力的 30% 考虑,围堰内围檩由原设计 3 层优化为 2 层、内支撑由原设计 2 层优化为 1 层(见图 5)。

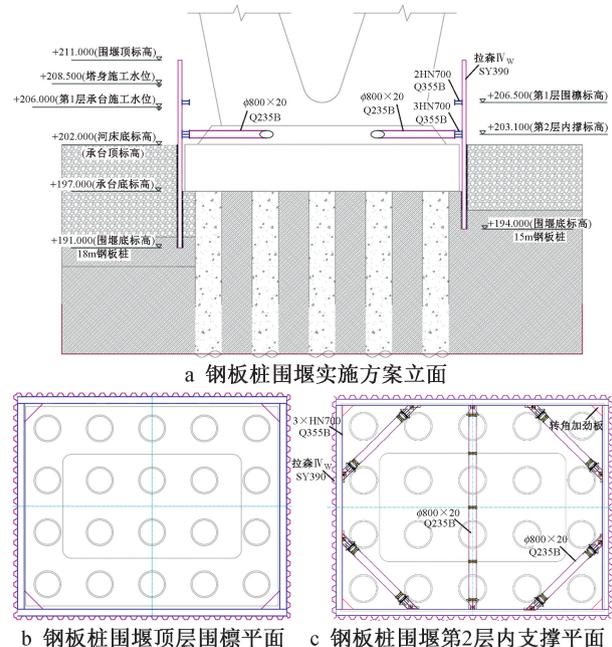


图 5 钢板桩围堰结构设计

Fig. 5 Structural design of steel sheet pile cofferdam

4 钢板桩围堰施工关键技术

4.1 总体工艺介绍

利用已完成工程桩将原钻孔平台加固,并利用该平台上旋挖钻机进行引孔施工,为防止卵石层坍塌,旋挖钻钻杆外设置可接长、可拆卸的装配式护套管。引孔完成后,孔内投入黏土并搅拌均匀,形成具有一定浓度的泥浆,孔内分层回填细砂,分层搅拌使砂与泥浆混合均匀。采用插板机施沉钢板桩,施沉过程中砂土被液化并振动密实。围堰形成后,围堰内抽水,安装内支撑,分层开挖至设计坑底后施作垫层(封底混凝土),转入承台干施工。围堰主要施工步骤如图 6 所示。

4.2 引孔质量控制

4.2.1 引孔参数设计

板桩采用 PU600×210 型钢板桩,引孔桩直径大小及咬合宽度应适宜钢板桩施沉,并具有一定的冗余度。因此根据钢板桩宽度,选择直径 120cm 钻头,搭接宽度不小于 35cm,理论上板桩与咬合孔壁净距(不小于 22cm,考虑到板桩有一定柔性,实际实

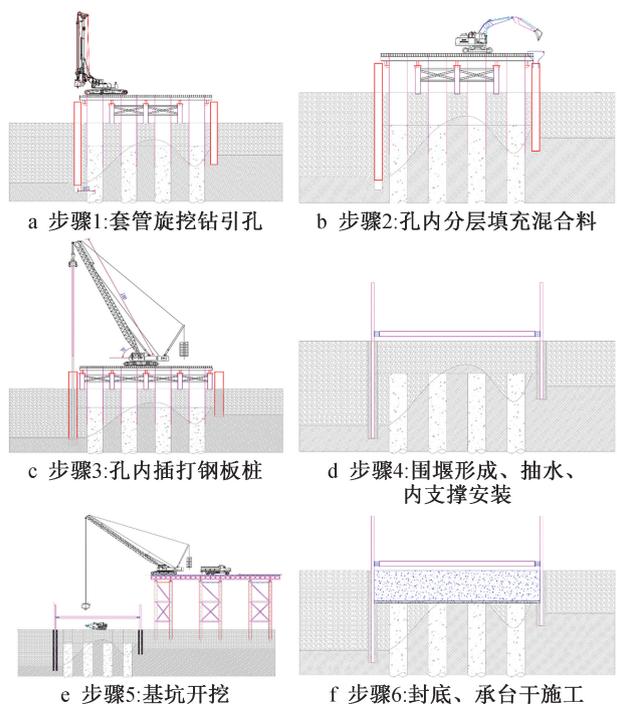


图 6 围堰主要施工步骤

图 6 Main construction steps of cofferdam

施时该距离还可以进一步调大,不会出现板桩被卡住无法打入的情况。

4.2.2 引孔平面位置及垂直度控制

为保证钢板桩能施沉到位,应避免出现以下问题:①引孔位置出现较大偏差,导致咬合搭接宽度不够,板桩被孔壁卡住不能施沉;②引孔垂直度出现较大偏差,导致引孔下部不能咬合,钢板桩亦不能施沉到位。

因此,引孔质量控制的关键是控制好其平面位置及垂直度。

1) 平面位置控制:主要通过设置定位尺、定位架的方式固定住套管,防止其偏移,定位装置安装前应提前做好引孔位置标记点。

2) 垂直度控制:主要控制旋挖钻钻杆的初始垂直度,在凸石、倾斜岩面等情况下应减压慢钻,施工中勤检查垂直度,发现问题及时纠偏,严禁不使用外套管直接引孔(外套管刚度较旋挖钻钻杆大,可有效防止引孔偏斜)。

4.3 围堰止水研究

4.3.1 砂与泥浆混合填料饱和填充止水试验

在 4 个容器内分别装入同样多的清水、浓度分别为 1.02, 1.05, 1.10g/cm³ 的泥浆,灌入细砂,充分摇匀、放置在试验室振动台上振动密实,容器底部开孔,静置不同时间观察不同容器漏水速率。

试验结果表明:①未加泥浆的容器(清水)渗漏

速度较其他容器明显更快,说明砂泥混合填料的止水效果更好;②浓度分别为 $1.05, 1.10\text{g}/\text{cm}^3$ 的泥浆漏水速度差异不大,说明浓度达 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 后,砂颗粒缝隙能基本被泥浆填满达到较理想的止水效果。

4.3.2 砂与泥浆混合填料饱和填充止水现场实施

为达到更好的止水效果,泥浆应能充分填充砂颗粒间的间隙。引孔完成后,旋挖钻护套管暂不拔出,先将黏土从护套管投入到孔底,再用旋挖钻钻头捣碎,旋转钻头充分搅拌,形成分散、性能均匀的泥浆。在泥浆中通过护套管分次投入细砂,每投一次采用旋挖钻钻头搅拌均匀,使泥浆与砂能够充分混合。

4.4 围堰开挖

由于墩位处的凸石、孤石以砂岩为主,强度较大,普遍高于 70MPa 。施工中硬岩主要采用“锚杆钻机打孔+液压劈裂”的方式开挖,强度稍低的泥岩部分采用炮机破除,此外,桩头采用水钻取芯。为保证开挖效率,液压劈裂施工中需要尽可能制造更多凌空面。

4.5 止水实施效果

抽水后,围堰侧壁无明显渗漏,坑内板桩周边填料密实,止水效果良好,基坑开挖过程中,砂泥混合填料板结密实。

5 结语

提出了套管旋挖钻引孔、钢板桩嵌岩、砂泥混合料填充止水成套施工技术,成功解决了“类喀斯特”地貌河床等复杂地质条件下埋置承台围堰成槽开挖及围堰止水施工难题,具有显著的社会效益与经济效益,在山区河流埋置承台施工中推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 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 S C, LIU Y, HU H, 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.
- [2] 谭少华. 港珠澳大桥主体工程浅水区非通航孔桥埋置式承台设计与施工[J]. 中外公路, 2014, 34(6): 121-126.
TAN S H. Design and construction of buried cap of non-navigable hole bridge in shallow water area of main project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34(6): 121-126.
- [3] 吴桥,石虎强,王帅. 跨江河桥梁浅水区埋置式承台施工围护结构应用研究[J]. 公路, 2020, 65(7): 193-198.
WU Q, SHI H Q, WANG S. Research on application of buried cap construction envelope in shallow water area of bridge across rivers and rivers [J]. Highway, 2020, 65(7): 193-198.
- [4] 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, 47(6): 117-122.
SUN G G. Selection of water stoppage scheme for embedded pile caps of non-navigable span bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge over shallow water area [J]. Bridge construction, 2017, 47(6): 117-122.
- [5] 邓星余. 裸岩全埋置式承台施工关键技术分析[J]. 河南科技, 2021, 40(20): 81-84.
DENG X Y. Analysis on key technologies of bare rock fully buried cap construction [J]. Henan science and technology, 2021, 40(20): 81-84.
- [6] 吴泽生,黄宜龙. 埋置式承台分离式柔性止水结构设计及施工[J]. 公路交通技术, 2020, 36(3): 72-77.
WU Z S, HUANG Y L. Design and construction technology of separated flexible waterstop structure with embedded bearing platform [J]. Technology of highway and transport, 2020, 36(3): 72-77.