

桥梁深水基础施工技术难点与解决方案

文 / 伍文会 中铁一院南方监理

摘要：伴随交通建设的持续推进，桥梁深水基础施工于各类大型桥梁工程里占据着关键之位。此文着眼于桥梁深水基础施工，自技术层面深度剖析常见施工技术类别，像钢围堰、钢套筒、钻孔灌注桩等技术的特性与应用。对施工过程中所面临的技术难点予以详尽阐释，涵盖水文地质条件繁杂、施工定位与精度把控难题、水下混凝土灌注质量管控问题等等。且针对这些难点，联系实际应用场景与案例，给出切实可行的解决之策，意在为桥梁深水基础施工给予技术参照与实践引导，推进桥梁工程建设技术的进步。

关键词：桥梁深水基础；施工技术；解决办法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.045

引言

现代桥梁建设当中，深水基础身为桥梁的重要支撑构造，其施工质量与技术层级径直影响着桥梁的稳固性与安全性。鉴于深水环境的复杂性，例如强水流、复杂地质、高水压等要素，为桥梁深水基础施工带来诸多挑战。对桥梁深水基础施工技术难点与解决办法展开研究，对于提升施工效率、确保工程质量、降低工程风险具备重大意义。本文细致分析常见施工技术类型，深入探究施工里的技术难点，并提出具有针对性的解决办法。

一、关于桥梁深水基础施工技术常见类型的剖析

（一）钢围堰施工技术

1. 双壁钢围堰的结构设计

双壁钢围堰作为深水基础施工中常用的一种结构，其由内外壁板以及竖向、水平支撑体系共同构成。在壁板厚度、竖向支撑间距以及水平支撑结构的选定上，通常需对水深、水压以及施工荷载等要素予以综合考量。壁板厚度通常处于 10 至 20 毫米之间，竖向支撑多选用角钢或者工字钢，其间距大致为 1 至 2 米，如此可保障围堰在下沉过程中的竖向稳定性能。而水平支撑则采用环形桁架结构，以强化围堰的抗侧力能力。于不同的施工状况下，双壁钢围堰各部分参数的选取会存在差异，具体可参见表 1。

表 1 双壁钢围堰各部分参数

水深范围 (m)	壁板厚度 (mm)	竖向支撑间距 (m)	水平支撑结构
10-20	10-14	1.5-2	环形桁架，弦杆采用 10 号工字钢，腹杆采用 8 号角钢
20-30	14-16	1-1.5	环形桁架，弦杆采用 12 号工字钢，腹杆采用 10 号角钢
30 以上	16-20	1-1.2	环形桁架，弦杆采用 14 号工字钢，腹杆采用 12 号角钢

以某长江大桥的施工为例，该桥所处位置的水深约为 25 米，双壁钢围堰的外径达 30 米，依据上述参数选择原则，壁板厚度为 16 毫米，竖向支撑采用 14 号工字钢，间距为 1.5 米，水平支撑采用环形桁架。在实际的施工过程中，该围堰成功抵御了水流与土压力，有力确保了基础施工得以顺利开展。

2. 钢围堰下沉工艺

钢围堰的下沉工艺主要涵盖起吊、定位、下沉以及纠偏等环节。起吊设备多倾向于选用大型浮吊，其起吊能力需依循钢围堰的重量与尺寸予以精确计算。定位方面通过 GPS 定位系统与导向船相互结合来施行，以保障围堰平面位置的偏差被控制在正负 50 毫米以内。于下沉进程中，借助在围堰内注水或者吸泥的方式来对下沉速度与垂直度予以调节。当有倾斜状况出现时，运用在高侧吸泥、低侧

压重的办法实施纠偏。以某跨海大桥的施工为例，钢围堰约重 5000 吨，运用起吊能力达 8000 吨的浮吊进行起吊操作，经由精准的定位以及下沉控制，最终促使钢围堰的垂直度偏差被控制在 1/500 以内，满足了设计方面的要求。

（二）钢套筒施工技术

1. 单壁钢套筒制作工艺

单壁钢套筒通常由钢板焊接而成，钢板的厚度需根据水深以及受力状况来确定，一般处于 8 至 16 毫米之间。套筒侧板与底板之间通过加劲肋来强化连接，加劲肋的间距大概在 0.5 至 1 米。在其制作过程中，必须严格把控焊接质量，运用诸如超声波探伤之类的检测手段来保证焊缝不存在缺陷。

2. 钢套筒的下放与封底

钢套筒下放之前，需于桥墩位置进行定位桩的设置，

凭借定位船与导向架将钢套筒精确下放至设计位置。在其下放进程中，要对套筒的垂直度与平面位置予以实时监测。封底乃是钢套筒施工的关键所在，采取水下混凝土封底的方式，将混凝土坍落度控制在 180 至 220 毫米之间。在封底之前，必须清理套筒底部的杂物，以保障封底混凝土与基底能够紧密结合。如在某内河大桥的施工中，钢套筒下放之后，借由定位系统将偏差调整至正负 30 毫米以内，封底混凝土选用 C30 水下混凝土，其浇筑厚度达 2 米，顺利完成了封底作业，为后续的桥墩施工奠定了基础。

（三）钻孔灌注桩施工技术

1. 冲击钻孔工艺

冲击钻孔适用于各类地层，特别是坚硬岩石地层。通过提升钻头并使其自由落下，利用冲击力破碎岩石，此乃冲击钻机的工作原理。通常情况下，钻头的重量处于 3 至 8 吨之间，冲击频率为 40 至 60 次每分钟。于钻孔进程之中，应依据地层状况对泥浆性能予以调整，泥浆比重需控制在 1.2 至 1.4 之间，黏度应为 18 至 22 秒。比如在某山区桥梁施工时，其基岩为花岗岩，运用冲击钻机实施钻孔，钻头重达 5 吨，冲击频率为 50 次每分钟，借由优质泥浆进行护壁，顺利地完成了钻孔作业，成孔垂直度的偏差被控制在 1% 以内。

2. 旋挖钻孔工艺

旋挖钻孔具备成孔速度迅疾、效率颇高的特性，适用于黏性土、砂土等之类的地层。旋挖钻机经由钻杆带动钻头旋转以切削土体，钻头直径依照桩径来确定，通常要比桩径小 20 至 50 毫米。在钻孔过程当中，采用静态泥浆护壁，泥浆比重需控制在 1.05 至 1.15 之间，黏度应为 16 至 18 秒。就如在某城市的桥梁施工里，地层是粉质黏土，采用旋挖钻机钻孔，其钻头直径为 1.2 米，成孔速度可达每小时 3 至 5 米，极大地提升了施工效率，并且成孔质量优良。

二、施工技术难点分析

（一）水文地质条件复杂

1. 强水流作用下施工设备稳定性问题

在深水环境中，强水流会对施工设备的稳定性形成严重威胁。当水流速度超出 2m/s 之际，浮吊等大型施工设备的晃动幅度会显著增大，进而致使设备定位面临困境，甚至有引发安全事故的可能。比如在某跨江大桥的施工中，于汛期时水流速度达至 2.5m/s，浮吊在起吊钢围堰之时，由于水流的冲击，其晃动幅度超过 1m，对钢围堰的下放精度以及施工安全产生了严重影响。而要化解这一问题，则需针对施工设备展开抗流加固，增进锚泊系统的数量与强度，同时对设备的重心设计予以优化，提升其抗流稳定性。

2. 复杂地质结构对于基础承载能力的影响

复杂地质结构，诸如软硬不均地层、岩溶地层等，会致使基础承载能力难以得到精确评估。于软硬不均地层中，在进行桩基础施工时容易出现桩身倾斜、缩径等

状况。例如某桥梁工程在穿越软硬不均地层之时，部分桩身倾斜度超出 3%，已然超出设计所允许的范围。在岩溶地层中，溶洞的存在或许会导致桩底落空，从而降低基础承载能力。为处理这些问题，需要在施工之前进行详尽的地质勘察，运用超前钻探、地质雷达等手段来查明地质状况，进而制定具有针对性的施工方案，比如在软硬不均地层采用预加固措施，在岩溶地层采用注浆来填充溶洞等。

（二）施工定位与精度控制

1. 水下测量定位精度易受干扰

深水环境中，水下测量定位精度会被诸多因素所干扰。水体的折射与散射会对测量信号的传播形成影响，进而致使 GPS 定位出现较大误差，通常能达 $\pm 100\text{mm}$ 及以上。与此同时，水面的波动会致使测量平台不够稳定，对全站仪等测量设备的观测精度产生影响。比如，在某跨海大桥的施工过程中，鉴于海面风浪较大，水下测量定位的误差达 $\pm 150\text{mm}$ ，无法契合钢围堰定位精度的要求。为提升测量精度，有必要采用高精度的水下声呐定位系统，并与实时动态差分 GPS 技术相结合，同时对测量平台予以稳定加固，以降低水面波动带来的影响。

2. 基础构件安装精度难以达成

像钢围堰、钢套筒等基础构件，其安装精度的要求极为严苛，平面位置的偏差一般需控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内，垂直度偏差需控制在 1/500 以内。然而在实际的施工时，因水流、风浪等因素的作用，安装精度往往难以得到保证。例如，某桥梁钢套筒在安装时，由于受到水流冲击，平面位置的偏差达到 $\pm 80\text{mm}$ ，垂直度偏差超过 1/300，对后续施工的质量产生了影响。为确保安装精度，安装工艺需予以优化，导向架、定位船等辅助设备应加以采用，并且施工过程中的实时监测与调整亦要强化。

（三）水下混凝土灌注质量控制

1. 混凝土离析与堵管问题

在水下混凝土灌注进程中，混凝土离析与堵管属于常见现象。若混凝土配合比不合理，像是砂率过低、水灰比过大，那么离析现象便容易产生。与此同时，在灌注过程中，导管理深若控制不当，比如埋深过浅，混凝土则容易混入泥浆而致使离析；若埋深过深，则可能引发堵管。如在某桥梁灌注桩施工时，由于混凝土砂率仅为 30%，低于设计所要求的 35% 至 40%，在灌注时便出现了离析，部分桩身混凝土强度无法满足设计要求。故而，要严格把控混凝土配合比，保证砂率、水灰比等指标契合设计要求，同时要对导管理深进行合理控制，通常应保持 2 至 6 米。

2. 桩身完整性检测难度大

桩身完整性检测乃是水下混凝土灌注质量控制的关键环节，然而在深水环境中检测存在较大难度。传统的低应变反射波法于长桩、大直径桩的检测中具有局限性，信号衰减颇为严重，难以精确判别桩身缺陷的位置与程

度。超声波透射法虽可较好地对桩身完整性予以检测，然而其对声测管的安装质量有着颇高要求，像声测管的堵塞、倾斜之类情况，皆会对检测结果产生影响。以某桥梁工程为例，其在采用低应变反射波法检测桩身完整性时，针对桩长超出 50m 的桩，检测结果的准确性欠佳。为增进检测精度，有必要综合运用多种检测方法，比如将低应变反射波法与超声波透射法加以结合，同时强化声测管的安装质量控制。

三、桥梁深水基础施工技术难点解决方案

(一) 应对水文地质条件的措施

1. 水流防护与施工设备加固

于强水流环境中，可凭借设置导流堤、水下防护结构等手段来降低水流对施工设备的冲击。导流堤通常由沙袋堆砌或者混凝土浇筑而形成，其高度依照水流深度以及流速来确定，一般处于 1 至 3m 之间。水下防护结构诸如防冲板，通过采用钢板或者钢筋混凝土进行制作，安装于施工设备底部，能够有效减少水流的冲刷。例如在某跨江大桥的施工过程中，设置了高度达 2m 的沙袋导流堤，并且在浮吊底部安装了厚度为 10mm 的钢板防冲板，从而使得浮吊在水流速度达 2.2m/s 的情况下依然能够稳定地开展作业。同时，需对施工设备的锚泊系统予以加固，通过增加锚的数量与重量，来保障设备于水流作用下的稳定性。

2. 地质适应性施工方法选择

对于复杂地质结构，应依据不同地层条件来挑选适宜的施工方法。于软硬不均地层，可运用预钻孔、预加固等手段。比如先以小直径钻头实施预钻孔操作，而后展开大直径桩施工，这样能切实避免桩身倾斜现象的发生。针对岩溶地层，则要在注浆填充溶洞之后再开展桩基础施工。诸如在某山区桥梁施工时，遭遇岩溶地层，借由向溶洞内注入水泥浆与水玻璃混合液，在填充完溶洞后再进行钻孔灌注桩施工，由此保证了桩基础的承载能力。在施工进程中，还必须依照地质变化适时调整施工参数，以确保施工质量。

(二) 提高施工定位与精度的方法

1. 高精度测量技术应用

将高精度水下声呐定位系统与实时动态差分 GPS 技术相结合加以运用，能够切实提升水下测量定位的精度。水下声呐定位系统凭借发射和接收声波信号来明确目标位置，其精度可达到 $\pm 10\text{mm}$ 以内。而实时动态差分 GPS 技术通过在基准站和流动站之间展开差分处理以消除误差，其定位精度可达 $\pm 20\text{mm}$ 以内。

2. 优化基础构件安装工艺

对于基础构件安装工艺的优化，能够切实有效地提升安装精度。通过采用诸如导向架、定位船之类的辅助设备，能够为基础构件给予精确的导向与定位。导向架通常以钢结构进行制作，依据基础构件的尺寸予以设计，且安装于桥墩之处，可对基础构件进行准确的引导以使其就位。定位船凭借锚泊系统固定于施工位置，

并利用绞车来对基础构件的位置以及垂直度进行调整。如在某桥梁钢套箱的安装过程中，借助导向架与定位船的协同配合，促使钢套箱的平面位置偏差被控制在 $\pm 30\text{mm}$ 以内，垂直度偏差控制在 $1/800$ 以内，进而保障了安装质量。

(三) 保障水下混凝土灌注质量的策略

1. 混凝土配合比优化与质量控制

对混凝土配合比的严格控制乃是保障水下混凝土灌注质量的关键所在。需结合工程的实际状况，经由试验来确定出合理的砂率、水灰比、外加剂掺量等相关指标。例如，在某桥梁灌注桩施工中，经过多次试验，确定砂率为 38%，水灰比为 0.45，外加剂采用高效减水剂，掺量为 1.5%，有效提高了混凝土的和易性、流动性与抗离析能力。同时，在混凝土生产过程中，加强原材料质量检测，定期对搅拌机进行校准，确保混凝土质量的稳定性。

2. 水下混凝土灌注过程监控

水下混凝土灌注的过程中，需强化对灌注参数的实时监控。借助压力传感器对导管内混凝土的压力予以监测，凭借对导管理深的测量来把控灌注速度。通常来讲，导管理深需维持在 2 至 6 米，而灌注速度应控制在每小时 30 至 50 立方米。一旦察觉混凝土压力出现异常或者导管理深未能符合要求时，即刻对灌注参数做出调整。如在某桥梁灌注桩的施工里，经由实时监控发现导管理深过浅，便即刻停止灌注，在提升导管之后再继续进行灌注，由此避免了混凝土混入泥浆，保障了灌注的质量。与此同时，要切实做好灌注记录，以为后续的质量检测提供相应依据。

结语

本文对桥梁深水基础施工技术予以了全面剖析，就常见施工技术类型进行了详尽阐述，还对施工过程中所面临的诸如水文地质条件复杂、施工定位与精度控制存在难题以及水下混凝土灌注质量控制等技术难点展开了深入分析，并针对这些难点给出了切实可行的解决之策。借助合理选择施工技术、对施工工艺加以优化、应用先进测量技术以及强化质量控制等举措，便可有效化解桥梁深水基础施工中的技术难题，提升施工质量与效率，确保桥梁工程的安全与稳定。

参考文献

- [1] 严赫强. 铁路桥梁深水基础施工技术 [J]. 价值工程, 2024, 43 (9): 62-64.
- [2] 白杰. 桥梁深水基础施工技术概述 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021 (10): 2591.
- [3] 陈光亮. 对桥梁深水基础大跨度水上作业平台施工技术研究 [J]. 模型世界, 2023 (22): 125-127.
- [4] 孙柏龙. 深水桥梁桩基础钢吊箱围堰施工技术 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020 (14): 1560.
- [5] 吕继刚. 桥梁工程深水桩基础钻孔灌注桩施工技术研究 [J]. 砖瓦世界, 2022 (3): 148-150.