

PHC 钢管组合桩在复杂地质条件港口中的应用

文 / 刘亚东 扬州华建交通工程咨询监理有限公司

摘要：预应力高强混凝土-钢管复合桩作为独具创新性的复合地基构造，兼具预应力高强混凝土管桩的坚韧特性与钢管桩的稳固优势，呈现出杰出的承载能力、出色抗弯强度及广泛适用范围，在地质条件要求极为严格的港口建设工程里表现亮眼。文章深度解析了此复合桩的结构特点并全面阐述其在复杂地质港口项目施工中的关键要点，涉及前期准备工作、核心技术流程、质量把控以及监测手段等诸多方面，结合具体工程实例文章还进一步探究该桩型在应对地质难题、保障工程质量与施工进度方面的实际成效，为类似工程项目提供极具价值的参考。

关键词：PHC 钢管组合桩；复杂地质条件；港口工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.030

引言

在全球经济繁荣、国际贸易火热的大环境下，港口建设成为国民经济中的关键部分。近几年，PHC 钢管组合桩新型复合材料结构在港口建设中表现亮眼，它把预应力高强混凝土管桩（PHC 桩）的坚固与钢管桩的韧性巧妙结合，不仅有出色的承载力和抗弯能力，还能灵活适应复杂地质环境，高度契合港口工程的特殊需求。本文深度剖析 PHC 钢管组合桩的特性及在复杂地质港口的实用技术，通过详解其结构设计、施工要点和实际工程案例，探究其在港口建设中的适用范围与突出优势，为同类工程设计和实施提供有益经验与启发。

一、PHC 钢管组合桩的特点

（一）单桩承载力高

从结构力学方面分析，PHC 钢管组合桩之所以具备出色的单桩承载能力，是因为精心设计的复合结构体系和材料方面的优势很好地结合在一起。在组合桩里，PHC 桩段用高强度的预应力混凝土制造而成，它的抗压强度能够达到 60MPa 以上，相比普通的混凝土桩，有非常大的优势。巧妙运用预应力技术后，桩体在受力状态时，会产生一个初始的压应力场，这个压应力场能够有效抵消外部荷载所引发的拉应力，从而进一步提升了整体的承载性能。组合桩的钢管部分采用的是 Q345 以上的高品质钢材，依靠其优良的力学性能，增加了桩体的横截面积以及整体的刚度，让受力状态得到了改善，这样就让组合桩系统可以同时承受更大的垂直和水平方向的载荷。在复杂多样的地质环境下，通过对不同桩段展开科学合理的设计，组合桩能够穿过软弱的土层，把荷载切实有效地传递到坚实的持力层，充分展现出端承效应。

（二）抗弯性能好

港口建设项目所处环境特殊、功能需求苛刻，这类基础设施既要承受巨大的竖向压力，又得抵御船只停靠冲击、海浪冲刷及地震等引发的水平力与弯矩，这使得桩基的抗弯性能在设计中至关重要。PHC 钢管复合桩在抗弯性能方面展现出卓越成效，其钢管部件凭借良好的抗弯刚度与出色的塑性应变能力，能有效应对弯矩作用。规划设计时，设计人员通常会把钢管设置在桩体上端或主要受力处，即弯矩峰值区域，通过精准调节钢管壁厚和长度，大幅提升桩的整体抗弯能力。从结构构造来讲，PHC 桩段结合了高强度混凝土与预应力技术，内部预应力钢筋合理布置为其提供了抵抗弯曲变形的基础支撑，对于 PHC 桩与钢管的连接部位，采用特定连接技术，保证这两种材料紧密协作，共同应对复杂的弯矩荷载考验。

（三）应用范围广

凭借卓越的综合优势，PHC 钢管组合桩在诸多复杂地质工况与工程环境中，展现出超凡的适配能力，特别是在港口建设项目中表现出众，这一新型桩体设计巧妙化解了软土地基承载力不足的难题。在河口、海湾等港口施工重点区域，通过改变桩体直径或优化钢管与 PHC 材料的组合配比，显著提升了整体支撑效能，从容满足工程的高标准要求。面对港口区域常见的复杂地层交织情况，像软硬土层交替、孤石与砾石层等阻碍，组合桩能根据实际地质条件灵活调整构造策略，在需要穿越坚硬地层时采用钢管桩段，在软土层则使用 PHC 桩段，进而充分发挥技术潜力。针对海港工程中海水侵蚀这一关键点，组合桩借助钢管外层特制防腐涂层、选用高性能耐腐蚀钢材以及阴极保护技术的综合运用，有效延长了自身使用寿命。

表 1 PHC 钢管组合桩与传统桩型性能对比

桩型	单桩承载力	抗弯性能	适用地质条件	抗腐蚀性	施工难度	造价水平	使用寿命
PHC 钢管组合桩	高	优秀	广泛，适应复杂地质	良好（需防腐处理）	中等	中高	长
普通 PHC 桩	中	一般	较单一，不适应硬层	优良	低	低	长
钢管桩	高	优秀	广泛	差（需严格防腐）	中	高	取决防腐
混凝土灌注桩	高	良好	广泛	良好	高	中高	长
钢筋混凝土预制桩	中	中	较单一	良好	中	中	中长

二、PHC 钢管组合桩在复杂地质条件港口中的施工要点

(一) 施工前准备

在地质状况复杂难测的港口建设工程中，施工前的周全筹备为 PHC 钢管组合桩的有序施工筑牢了坚实基础^[1]。在各项准备工作里，工程地质勘探起着至关重要的作用，它借助钻探操作、原位测试以及室内土壤检测等多样技术方法，可全面深入地剖析工程区域的地层构造、物理力学属性和地下水变化等关键地质信息。面对地质情况复杂多变的施工场景，项目团队往往会有策略地增加勘探点布置，并在特定地段采用地震波反射勘探、电阻率勘探等专业地球物理手段，以实现对地下情况的全面掌握，为后续桩基设计与施工提供科学、可靠的地质依据。依托这些详尽精准的地质资料，工程技术人员能进一步开展 PHC 钢管组合桩的精确设计计算与方案完善，从而确定最合适的桩长、桩径数值，以及钢管和 PHC 桩的最佳组合与连接形式。针对那些技术难度极大的复杂项目，有限元分析等先进计算技术的运用，让工程师可以模拟不同工况下桩基的受力情形，进而对设计方案进行精确优化与调整。

(二) 关键施工工艺

1. 沉桩方法

在 PHC 钢管组合桩施工流程里，选择恰当的沉桩方式极为关键，要根据复杂多变的地质条件以及特定工程需求灵活抉择。针对港口工程里复杂多样的地质难题，一般会采用多种沉桩策略，如借助锤击力达成沉桩、运用振动技术使桩体沉入、采取静力压桩方式，或是利用水冲法辅助沉桩工作。

锤击沉桩工艺源远流长、应用范围广泛且可适配不同地质条件，特别是在遭遇坚硬土层或含砾石的复杂地质时优势突出^[2]。在港口建设工程里常借助柴油锤或液压锤开展沉桩工作，柴油锤因结构简单、能量充足、施工高效成为大直径 PHC 钢管群桩施工的优先选择，液压锤则凭借低噪音、微震动、冲击强度可控等特点在环保要求高的项目中颇受喜爱，实施锤击沉桩时要精准把控锤击力度和频率以防止过大冲击力损伤桩体。

振动打桩技术可用于砂质、粉质等非粘性地层，凭借高频振动降低桩身侧面摩擦力让桩体顺利下沉。此方法以作业高效、噪音低闻名，但在粘性土壤或有砾石、孤石的地质环境中效果会大幅降低，在港口软土地基处理里振动打桩机起辅助作用并常和锤击法配合使用以加快施工速度。

静力沉桩技术适用于土质松软的基础，通过平稳下压的方式把桩体深深埋入土壤，该方法对桩身损伤较小，作业时噪音微弱，利于环境保护。然而，静力沉桩对施工器械的标准要求相当严格，若遇到坚硬地层或地下障碍物，施工进度就很难推进，因此，在地质条件复杂多样的情况下，常常需要将它与其他工艺配合使用。

在桩尖处安装水冲装置，依靠高压水流冲击周边土体，以此降低桩尖所遇阻力，推动桩体平稳下沉，这是水冲法辅助沉桩工艺。该技术特别适合砂土、粉土等非黏性土质环境，可大幅提高沉桩作业的效率，还能减少对桩体的损伤。不过，要留意的是，水冲法会干扰桩周土体，影响桩的侧摩阻力性能，所以在操作时要精准把控水冲参数，当桩体快到预定深度时及时停止水冲，改用锤击方式完成最后的贯入步骤。

表 2 PHC 钢管组合桩主要沉桩方法特点及适用条件对比

沉桩方法	主要特点	适用地质条件	优势	局限性
锤击沉桩	通过锤击冲击力将桩打入土中	各种地质条件	适应性强，能量大，效率高	噪音大，对桩体冲击力大
振动沉桩	利用高频振动降低桩侧摩阻力	砂土、粉土等非黏性土层	效率高，噪音相对较小	在黏性土或含砾石层中效果差
静力压桩	采用静力将桩压入土中	软土地基	对桩体损伤小，噪音低，环境友好	设备要求高，遇硬层难以施工
水冲法辅助	高压水流冲击降低桩尖阻力	砂土、粉土等非黏性土层	提高沉桩效率，减少桩身损伤	扰动桩周土体，影响侧摩阻力

2. 桩身连接技术

PHC 钢管组合桩的桩身连接是确保组合桩整体性和承载性能的关键技术环节，根据不同的工程要求和桩型结构，常用的连接方式包括套筒连接、焊接连接、法兰连接和螺栓连接等。

套筒连接一般会事先在 PHC 桩末端安装钢套筒，接着把钢管插入其中，再借助焊接工艺或灌浆方式予以固定，这种连接方法操作简便，连接处牢固可靠，能满足诸多工程项目的要求。

焊接技术多用于衔接钢管段落以及钢管与预埋钢板的连接处，开展焊接作业前务必仔细清理并预先处置接口以确保焊接作业具备优良品质^[3]。焊接工艺一般采用

全熔透焊缝形式并借助超声波或射线等无损检测手段严格检验焊缝的可靠性，尤其是在海洋这类腐蚀性环境里焊接接头还得采取防腐举措防止因腐蚀侵害而降低连接强度。

法兰连接形式特别适合那些需要经常拆卸安装或者后期要进行维护的结构，它依靠预先制作好的法兰盘以及高强度螺栓来实现牢固连接，这种连接方式具备施工简便、连接稳定的优点，不过其成本相对较高，而且法兰部位常常是应力集中的地方，所以在设计和施工期间必须给予高度关注并谨慎操作。

螺栓连接常和其他连接方式配合使用，比如在法兰连接时用螺栓紧固，或者借助预先埋设的螺栓，让钢管

与预应力高强混凝土桩（PHC 桩）稳定相连。螺栓连接应注意螺栓的材质选择和防腐处理，确保长期使用安全可靠。

3. 防腐处理

在海洋港口环境中，腐蚀是影响桩基使用寿命的主要因素。PHC 钢管组合桩中的钢构件尤其容易受到海水腐蚀，因此防腐处理是组合桩施工中的重要工艺环节。涂层保护是最基本和广泛使用的防腐方法，对于钢管段通常采用环氧煤沥青、环氧树脂、聚氨酯等防腐涂料进行表面处理^[4]（如图 1 所示）。涂层施工前应对钢表面进行充分的除锈和清洁处理，达到规定的表面处理等级。涂层应均匀覆盖，无漏涂、气泡、裂纹等缺陷，涂层厚度应符合设计要求，通常为 300 ~ 500 μm。

阴极保护是通过外加电流或牺牲阳极使钢结构表面形成阴极区域，从而抑制腐蚀的方法。在重要的港口工程中，通常采用外加电流阴极保护系统，通过设置永久性阳极和自动控制装置，使钢结构保持在保护电位范围内。牺牲阳极保护则是通过安装铝、锌、镁等活性金属阳极，利用电化学原理保护钢结构。牺牲阳极保护系统结构简单，维护方便，但保护范围有限，通常用于局部区域或与涂层保护配合使用。



图 1：防腐钢管图

（三）质量控制与监测

在复杂地质条件的港口建设中，PHC 钢管组合桩的质量把控与监测，是保证桩基达到设计标准并实现长期安全应用的核心要点^[5]。质量管控需覆盖从材料筹备、施工开展直至竣工验收的全部阶段。施工单位首要任务是严格管理原材料，其中涵盖对 PHC 管桩强度级别、尺寸精准度、预应力筋设置等参数的检测，以及对钢管的材质、管壁厚度、管径等参数的审核。

施工期间质量管控的关键之处，包含定位放线、沉桩作业把控以及连接质量把控等方面。定位放线工作应借助精密测量设备，确保桩的位置偏差处于许可范围之内。在沉桩作业时，要详细记录贯入度、锤击次数、桩顶标高之类的参数，并绘制贯入度曲线，以便及时察觉异常状况^[6]。针对显著异常的贯入阻力变动，需分析背后原因并采取对应的解决办法。连接质量把控则包含对

连接部位几何尺寸的检查、焊接质量的检测以及灌浆质量的查验等，从而保障连接稳固可靠。除了施工过程中的质量把控，还需要构建长期监测体系，对桩基在使用过程中的性能进行监测。像光纤传感、GPS 定位、远程数据收集等现代化监测技术，可用于实时掌握桩基状态，及时发现潜在问题。

三、PHC 钢管组合桩在复杂地质条件港口中的应用案例分析

扬子嘉盛天然气码头项目位于江苏省江阴市石庄镇石利港区石庄作业区，是一个重要的能源基础设施项目。该项目主要建设内容包括新建 2 个 LNG（液化天然气）泊位及 1 个工作船码头，建成后将为江苏省及长江中下游地区交通水运行业应用 LNG 清洁能源提供支持，对国家能源发展战略提供有力支撑。

考虑到工程的特殊性和复杂的地质条件，设计采用 PHC 钢管组合桩作为主要基础形式。项目共设计 PHC 桩基 329 根，其中工作船码头 60 根，引桥工程 133 根，联桥工程 136 根。PHC 桩采用高强度预应力混凝土制作，桩径为 800mm，钢管采用 Q345B 钢，壁厚 16mm，直径 820mm。随着最后一根 PHC 管桩的成功沉入，扬子嘉盛天然气码头项目的 PHC 管桩桩基全部完成。从空中看去，俯仰不一的 PHC 管桩在长江中各归其位，在奔流不息的江水中岿然不动，为后续的横梁和上部结构施工奠定了坚实基础。

结语

本文围绕 PHC 钢管组合桩在复杂地质条件港口中的应用展开系统研究，深度剖析了其结构特性、施工关键点以及相关工程案例。伴随港口工程朝着深水、大型化方向发展，对桩基础的要求日益提升，PHC 钢管组合桩技术依然存在较大的发展与创新空间。通过持续的技术革新与工程实践，PHC 钢管组合桩将为港口建设供给更为可靠、经济且环保的基础支撑方案，为国家交通运输以及能源基础设施建设发挥更大作用。

参考文献

- [1] 郝俊宇. PHC 钢管组合桩结构设计及施工应用研究 [J]. 中国水运, 2024, 24(20): 126-127+130.
- [2] 吴璟锐. 钢管桩沉桩施工技术在码头工程中的应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2024, (19): 233-235.
- [3] 宋志博, 王鑫, 蒋春平, 等. 长江流域 PHC 管桩高质量沉桩施工关键技术分析 [J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(S1): 60-63+93.
- [4] 杨晓松, 倪晓雯, 李春良. PHC-钢管组合桩在潍坊地区沿海港口建设中的应用 [J]. 水运工程, 2024, (03): 46-52.
- [5] 艾红霞, 李楠, 伊西凯, 等. 港口工程桩基设计及施工特点 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(18): 13-14.
- [6] 苏晓栋, 李致, 孟星宇, 等. 上钢下混组合桩水平承载性能影响因素分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(02): 130-136.