

内河航道护岸工程地基处理设计分析

王心雨

(华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210001)

摘要 本文基于典型内河航道地质、水文条件及现有护岸工程实际情况, 对地基力学特性进行了系统分析, 并提出护岸工程地基处理设计原则。针对土体加固、排水降水、桩基与复合地基等技术方法, 结合实际参数与施工条件进行设计探讨, 强调设计目标、技术选择原则、规范标准应用及环境经济影响评估。通过专业化设计方法, 旨在为内河航道护岸工程地基处理提供有益参考。

关键词 内河航道护岸工程; 地基处理; 桩基; 土体加固; 排水降水

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.013

0 引言

内河航道护岸工程作为水运基础设施的重要构成部分, 其结构稳定性直接依赖地基承载能力和抗沉降性能。随着航道通航能力提升以及岸线加固需求增多, 护岸工程施工面临软土层厚、地下水位高、沿岸荷载复杂等问题。以典型长江中下游航段为例, 护岸地基平均土层厚度能达 6 ~ 15 m, 当中粉质黏土占 50% ~ 70%, 地下水位离地面 0.8 ~ 2.0 m, 标准贯入试验 (SPT) 数值 $N=2 \sim 8$, 说明土体软且可塑性强。本文针对地基承载力欠缺、沉降和滑移风险, 从地质、水文、力学特性以及现有护岸工程问题着手, 剖析地基处理设计方法, 为后续施工提供科学依据。

1 内河航道护岸工程地基现状分析

1.1 地质条件及水文特征

护岸沿线大多处在河漫滩沉积区域, 地层主要是第四系冲洪积层, 含有粉质黏土、粉砂以及部分砂层, 平均土层厚度 6 ~ 15 m, 地下水位高, 季节波动显著, 夏季水位能到离地面 0.5 m 处, 冬季降到 1.5 m。地质钻探数据表明黏土液限 $WL=35\% \sim 45\%$, 塑限 $WP=20\% \sim 25\%$, 塑性指数 $IP=15 \sim 25$, 表明软土可塑性强、易出现长期沉降, 河道水流速约 0.8 ~ 1.2 m/s, 洪水期可达 3 m/s, 对岸坡稳定性提出很高要求, 该区域冲刷与淤积交替出现, 河床容易出现坡脚侵蚀, 增加护岸地基承载风险^[1]。

1.2 地基力学特性分析

典型软土抗压强度 σ_c 约为 50 ~ 120 kPa, 剪切强度参数内摩擦角 $\phi=18^\circ \sim 25^\circ$, 黏聚力 $c=20 \sim 40$ kPa,

弹性模量 $E=3 \sim 10$ MPa, 压缩模量 $E_s=2 \sim 5$ MPa。标准贯入试验 (SPT) 表明 N 值大多低于 10, 沉降系数大概是 0.05 ~ 0.15 cm/kPa, 长期沉降明显, 承载力计算采用 Terzaghi 极限承载理论及浅基础经验系数, 预计在荷载 200 kPa 情形下可能产生总沉降 50 ~ 120 mm, 且伴随差异沉降 15 ~ 30 mm, 有潜在滑移风险存在^[2]。地基孔隙比 e 取值范围是 0.7 ~ 1.2, 饱和度近乎 100%, 说明软土渗透程度低, 降水和加固措施必要。

1.3 现有护岸工程问题与风险分析

现存混凝土板桩或石砌护岸普遍有板桩沉降不均、滑移以及局部破坏情况, 主要因地基软、承载力不够以及地下水冲刷。例如: 30 ~ 50 m 长护岸段在高水位时沉降累积有 50 ~ 100 mm, 局部滑移角约 $3^\circ \sim 5^\circ$, 桩顶高差能到 0.08 ~ 0.15 m。护岸基础大多是浅基础或轻型复合基础, 没充分顾及软土长期固结沉降以及孔隙水压力变化, 致使结构应力集中, 风险分析表明, 要是不做系统地基处理, 护岸在洪水冲刷及船舶波浪荷载作用下会出现裂缝、滑移和整体失稳^[3]。

2 护岸工程地基处理设计原则

2.1 设计目标与基本要求

护岸地基处理设计核心目标是确保结构长期稳固、沉降可控以及荷载传递可靠, 兼顾施工可行与经济, 具体要求包含承载力要满足设计荷载不低于 250 ~ 300 kPa, 确保护岸板桩或复合基础在船舶波浪和洪水荷载作用下不出现局部破坏; 总沉降控制在 50 mm 以内, 差异沉降小于 15 mm, 防止板桩错位或护岸裂缝; 桩基或复合地基纵向沉降差不超 1/300, 确保整体平整性; 施工周期要和河道航运窗口适配, 减少对通航影响, 施工时

作者简介: 王心雨 (1998-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 船闸与航道工程结构设计及概预算编制。

要严格把控环境指标，例如：粉尘排放 $\leq 50\text{ mg/m}^3$ 、施工噪声 $\leq 75\text{ dB(A)}$ ，结合现场监测调整施工节奏，实现安全、经济以及环境友好型地基处理。

2.2 地基处理方法选择原则

地基处理方法选择需遵循“安全可靠、技术成熟、经济合理、施工便捷”的原则，结合软土力学特性和河道工程特点做决策，软土加固能用高模量水泥注浆、深层搅拌桩或预压固结技术，其中搅拌桩桩径 $0.6\sim 1.0\text{ m}$ 、间距 $1.5\sim 2.0\text{ m}$ ，能大幅提升土体承载能力与刚度；排水降水措施要结合地下水位高程、渗透系数 $k=1\times 10^{-6}\sim 1\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 及季节性水位波动来设计，确保孔隙水压力有效降低；桩基及复合地基适用于承载力低于 200 kPa 或沉降控制要求严格的段落，要综合考量土层厚度、桩长以及桩间距，同时比选多方案，综合施工难度、成本、环保影响以及技术风险，确定最优处理方案^[4]。

3 内河航道护岸常用地基处理方法设计

3.1 土体加固技术

软土加固常用方法包括深层搅拌桩（DSS）和高模量水泥土注浆，这些方法主要针对软弱黏土层厚度 $6\sim 12\text{ m}$ 的护岸段，施工前要做钻探和标准贯入试验（SPT）或静力触探（CPT）明确土层厚度、土体类别、承载特性以及地下水位状况，并结合土体含水程度、液限以及压缩模量设计桩径 $0.6\sim 1.0\text{ m}$ 、桩间距 $1.5\sim 2.0\text{ m}$ 的加固布置方案，保证覆盖全部软弱土层。深层搅拌桩施工顺序是桩位测量→搅拌桩机下入土层→分层注入水泥浆或水泥粉煤灰混合浆体→搅拌均匀，每层浆体厚度 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ ，浆体水灰比 $0.35\sim 0.45$ ，加入粉煤灰或矿渣 $20\%\sim 30\%$ ，能让搅拌桩抗压强度达到 $2\sim 5\text{ MPa}$ ，弹性模量 $E=50\sim 150\text{ MPa}$ 。施工时要监测桩体水平偏移 $\leq 50\text{ mm}$ 、垂直度 $\leq 2^\circ$ 、桩顶高差 $\leq 10\text{ mm}$ ，以免桩体错位致使承载力不均或局部沉降有差异^[5]。如表 1 所示，桩径大、浆体配比合理，搅拌桩抗压强度和弹性模量越高，能有效提升软土承载能力。

施工控制包含浆体注入量以及搅拌参数管理，每根桩要记录浆体注入量（一般控制在 $0.8\sim 1.2\text{ m}^3/\text{m}$ 桩深）以及注浆压力 $0.6\sim 1.2\text{ MPa}$ ，搅拌转速能依照土体阻力以及浆体流动性来调节，保证浆体和土体充

分混合，防止出现空洞或分层状况。加固完要做原位承载力检测，如低应变波速检测、圆柱体抗压试验或现场静载试验，依据桩强度和土体刚度调整后续施工次序，施工顺序依照“由下至上、由远及近、分区施工”，每一区段完成后需进行沉降监测和孔隙水压力监测，必要时结合预压固结技术提高早期刚度，特别是在高液限黏土区域，能设置桩间排水砂井或垂直排水管，加快孔隙水释放，确保土体应力状态可控。

加固施工管理还包含材料质量以及环境控制，水泥浆和掺合料要符合标准规范，水泥强度等级 $\geq \text{P}\cdot\text{O}42.5$ ，粉煤灰要细度 $> 400\text{ m}^2/\text{kg}$ ，防止浆体泌水以及早期流失，施工现场要对桩机位置、桩体垂直度、浆体注入压力及流量做连续记录，并建立施工日志，实现过程可追溯。施工时粉尘排放 $\leq 50\text{ mg/m}^3$ 、噪声 $\leq 75\text{ 分贝（A）}$ ，结合河道航运窗口组织分段施工，保证施工安全、技术参数可控以及施工过程标准化。

3.2 排水与降水技术

在内河护岸施工中，软土厚度大且地下水位高，要布置纵向排水管（砂管或毛管）以及地表排水系统，排水管设计间距 $1.0\sim 1.5\text{ m}$ ，长度覆盖软土厚度，孔径 $10\sim 15\text{ mm}$ ，渗透系数 $k=1\times 10^{-5}\text{ m/s}$ ，保证降水均匀。施工前要做地下水位测量以及土体渗透系数测试，还布置施工监测点，利于随时知晓孔隙水压力和水位变动，施工顺序是测量布点→安装滤砂套管→下放抽水管→并联机组抽水，水泵抽水能力按设计流量 $Q=50\sim 100\text{ L/s}$ 配置，根据土层厚度和地下水位调整井点数量及深度。管道末尾要设置滤网，防止细土堵塞，施工期定期检查并清理，确保系统稳定运转。

排水系统施工需与护岸结构施工协调，预防桩基或加固桩施工和排水管道布置产生冲突，施工时可采用原位渗透系数测试结果调整排水管道间距或布置密度，保证每米护岸段降水均匀，施工中应记录抽水量、泵速及水位变化，结合土体沉降监测做动态调整，防止局部降水过多或土体受扰。针对厚度超 6 m 的软土区域，要分层监测沉降速率和差异沉降，必要时设临时排水沟或集水井辅助排水。

排水施工结束后，要在护岸结构下面设置长期排水设施，像排水层、毛管或集水沟，确保基底孔隙水长久管控，施工进度材料挑选要符合耐腐蚀与渗透性能需求，

表 1 深层搅拌桩施工参数与力学性能

桩径（m）	桩间距（m）	浆体水灰比	掺合料比例	抗压强度（MPa）	弹性模量 E（MPa）
0.6	1.5	0.35	粉煤灰 20%	2	50
0.8	2	0.4	矿渣 30%	3.5	100
1	2	0.45	粉煤灰 + 矿渣 25%	5	150

砂管或毛管孔径 10 ~ 15 mm, 管材耐压 ≥ 1.5 MPa, 滤砂套管孔径 1.0 ~ 1.5 mm。施工中所有水位和孔隙水压力数据需归档, 用于后续沉降分析和土体状态评估, 同时保证施工环保要求达标准, 减少河道水位波动及周边环境的影响。

3.3 桩基及复合地基技术

在承载力小于 200 kPa 或沉降控制要求严格的护岸段, 应采用预制混凝土桩、灌注桩或钢管混凝土桩, 如表 2 所示。桩径设计为 0.4 ~ 0.8 m, 桩长覆盖软土层到基岩或密实砂层, 桩间距 1.5 ~ 3.0 m, 具体间距能依照桩承载力与土体承载等级来调整。施工前需对桩位进行高精度测量, 桩基施工顺序是桩位放样 → 钻孔或静压桩 → 灌注或就位预制桩 → 桩顶连接及桩帽板施工, 桩顶高差控制 ≤ 20 mm, 桩身垂直度 ≤ 2°,

保证整体沉降均匀, 桩施工能用静压桩机或振动下桩, 施工时要装 Osterberg 仪测桩端承载力, 计算设计承载力和安全系数 1.2 ~ 1.4, 监控桩身承载性能。施工要记录桩沉降量、桩身垂直度、桩顶高差和桩端承载力, 确保施工数据能追溯, 根据地下水位和孔隙水压力实时调整施工参数, 防止桩身受水压作用致使施工出现异常情况。

复合地基施工要对桩间土体加固和回填密实度做精细化控制, 桩间回填土一般厚度是 0.3 ~ 0.5 m, 每层回填土需夯实至干密度 95% ~ 98%, 同时监测桩间孔隙水压力, 防备局部沉降扎堆或土体搅扰, 桩帽板施工前, 应测量桩顶标高, 并借桩帽调节板面高程, 必要时在桩间做注浆加固, 保证桩土板整体刚度均匀。施工时要同步记录桩顶高差、回填土密实程度以及桩

表 2 内河护岸桩基主要参数

桩型	桩径 (m)	桩长 (m)	桩间距 (m)	桩端承载力 (kPa)	安全系数	桩顶高差 (mm)	垂直度 (°)
预制混凝土桩	0.4 ~ 0.8	覆盖软土至基岩	1.5 ~ 3.0	200 ~ 400	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2
灌注桩	0.5 ~ 0.8	12 ~ 18	1.5 ~ 2.5	250 ~ 450	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2
钢管混凝土桩	0.4 ~ 0.6	10 ~ 15	1.5 ~ 2.0	220 ~ 400	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2

端承载能力, 并结合地下水位监测数据, 控制桩基施工过程中土体受水压力变况, 防止局部液化或孔隙水压力异常, 复合地基施工顺序要依照“分区施工、先中心后周边、由下至上”的原则, 每一区段完成后进行沉降及应力监测, 给后续护岸结构施工提供精准基础参数, 确保桩—土—板体系施工精度合乎设计要求。

3.4 环境与经济影响分析

地基处理施工要综合考量环保要求与经济合理性, 在土体加固施工中, 水泥浆用量 ≤ 300 kg/m³, 并可掺入 20% ~ 30% 粉煤灰或矿渣, 来降低碳排放且提高材料利用率, 桩基施工用预制桩, 能让工期缩短 20% ~ 30%, 降低河道施工扰动, 并降低施工现场占地面积。排水降水能搭配回用系统, 把抽完水的地下水用于施工灌浆或土体加湿, 降低河道水位波动以及对周边生态造成的影响。

在经济分析中, 地基处理中的土体加固施工成本约 1 500 ~ 2 500 元/m², 桩基及复合地基施工成本约 2 000 ~ 3 000 元/m², 按照土层厚度、软土性质和荷载等级动态调整处理方案, 施工方案挑选要经多方案比选, 综合施工难度、材料消耗、设备需求、环保措施及河道航运窗口影响, 保证地基处理技术优化、施工经济合理, 同时符合护岸设计承载能力、沉降控制以及施工可行要求, 实现技术、经济与环境兼顾。

4 结束语

内河航道护岸工程地基处理设计需综合地质、水文、土力学特性及现有护岸问题, 明确设计目标和沉降控制要求, 选择安全、经济、可施工的地基处理方法。通过土体加固、排水降水及桩基复合地基等技术手段, 可系统提高护岸地基承载力, 降低沉降和滑移风险。设计中应严格控制施工精度、监测地下水位及孔隙水压力, 确保地基处理措施科学合理, 为内河航道护岸工程长期稳定提供技术保障。

参考文献:

[1] 牛芸, 吕义港. 长螺旋钻孔灌注桩在内河航道养护工程中的设计研究 [J]. 珠江水运, 2020(22):65-66.
 [2] 乐星华, 魏必文. 航道护岸软基处治中土工格栅加筋技术的应用 [J]. 珠江水运, 2023(19):33-35.
 [3] 唐凤肖, 吕思宜. 内河航道软基处理方案比选研究 [J]. 珠江水运, 2025(12):107-109.
 [4] 蔡志斌. 劲性复合桩在船闸地基处理施工中的应用 [J]. 珠江水运, 2025(17):37-39.
 [5] 洪晶晶, 赵嘉俊. 在建隧道上方航道护岸软弱地基处理方案研究 [J]. 中国水运, 2025(16):74-75, 78.