

潮间带咬合桩无泥浆护壁施工关键问题与对策

——基于中东某取水井工程的顺序性分析

王成斌

中国石油管道局工程有限公司中东地区公司, 阿联酋 阿布扎比

收稿日期: 2026年4月10日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月23日

摘要

中东某项目取水井单体结构位于潮间带, 采用“全钢护筒支护、无泥浆护壁”的特殊工艺施工钻孔咬合桩。本文按施工流程顺序, 系统梳理了该工艺实施中暴露出的五个关键问题: (1) 护筒沉设阶段: 长护筒在超软弱土层中难以保证绝对垂直与对中; (2) 钻进成孔阶段: 石灰岩层硬度不均, 且高强度素混凝土桩(C40/C50)的设计要求加剧了钻进困难与钻头损耗; (3) 钢筋笼安装阶段: 护筒内狭小空间导致钢筋笼定位困难, 保护层控制易失效; (4) 护筒起拔阶段: 起拔护筒过程中混凝土易沿筒外缝隙流失造成方量损失; (5) 基坑开挖与后续结构阶段: 已成桩体偏斜导致原设计“植筋挂网喷浆”永久衬砌工法无法实施, 无法保证100 mm厚衬砌层的均匀成型。针对上述问题, 本文详细阐述了相应的现场技术对策, 包括护筒沉设的双向监控与微纠偏、钻头库动态适配、装配式高强定位垫块应用、基于起拔控制的混凝土流失防护与实时补偿, 以及创新的“井底台阶法”。该法通过重构施工基准面, 系统性恢复了衬砌结构的设计厚度与完整性, 同时客观导致了约5%的井容量损失。工程实践表明, 这套顺序性问题解决方在保障结构安全与功能的前提下, 有效应对了施工挑战, 为类似极端地质条件下的桩基工程提供了系统的、包含技术经济权衡的实践经验。

关键词

咬合桩, 无泥浆护壁, 钢护筒, 井底台阶法, 容量损失, 工程权衡

Key Issues and Solutions for Slurry-Free Construction of Intertidal Secant Pile Driving

—A Case Study of an Intake Well Structure in a Middle East Project

Chengbin Wang

CPP Middle East, Abu Dhabi, UAE

Abstract

An intake well structure of a Middle East project, located in the intertidal zone, employed a special construction method of “full-length steel casing support without slurry wall protection” for secant piles. This paper systematically identifies five key problems encountered during the implementation of this method, following the construction sequence: (1) Casing Installation Phase: Difficulty in ensuring absolute verticality and centering of long casings in ultra-soft soil layers; (2) Drilling and Hole Formation Phase: Inefficient drilling and excessive tool wear due to uneven hardness of the limestone layer, compounded by the stringent requirements for high-strength plain concrete piles (C40/C50); (3) Reinforcement Cage Installation Phase: Difficulties in cage positioning and ineffective control of concrete cover within the confined casing space; (4) Casing Extraction Phase: Loss of concrete volume due to leakage along the outer wall of the casing during its extraction; (5) Excavation and Subsequent Structure Phase: The designed “shotcrete lining with planted rebar and mesh” method became inapplicable due to pile deviation, failing to guarantee a uniform 100 mm thick lining. Corresponding on-site technical countermeasures are elaborated, including bidirectional real-time monitoring and micro-correction during casing installation, dynamic adaptation from a tool library, application of prefabricated high-strength spacer blocks, anti-leakage control and real-time compensation during casing extraction, and the innovative “base footing bench method.” This method reconstructs the construction datum plane to systematically restore the design thickness and integrity of the lining structure, while objectively resulting in a loss of approximately 5% of the well’s capacity. Engineering practice shows that this sequential problem-solving approach effectively addressed the construction challenges while ensuring structural safety and functionality, providing systematic and pragmatic experience that includes technical-economic trade-offs for similar pile foundation projects in extreme geological conditions.

Keywords

Secant Piles, Slurry-Free Wall Protection, Steel Casing, Base Footing Bench Method, Capacity Loss, Engineering Trade-Off

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近海潮间带区域“上软下硬”的极端地层——上部为厚达数米的流塑状软弱土层，下部为稳定基岩——对传统钻孔灌注桩工艺构成了严峻挑战。其中，依赖泥浆护壁的常规工法在此类地层中面临根本性失效风险。其机理主要在于[1]：(1) 极软弱的流塑土层自稳能力极差，内聚力近乎为零，钻孔后孔壁无法自稳，且泥浆难以在其表面形成有效的护壁泥皮；(2) 受潮汐影响，地下水与海水连通并剧烈波动，导致孔内外水压力平衡被反复打破，极大增加了维持泥浆柱压力稳定的难度；(3) 软硬地层交界面处存在显著的应力集中效应，易引发孔壁颈缩或坍塌，是泥浆护壁体系的薄弱环节。中东某项目取水井单体结构在初期试桩中充分证实了上述问题，常规方案完全无法维持孔壁稳定。因此，项目果断放弃了泥浆护壁路线，转而采用“以长钢护筒作为绝对支护体”的特殊施工方案。该工程采用钻孔咬合桩作为支护结构，

其中 A 桩为 C40/C50 高强度素混凝土桩，B 桩为钢筋混凝土桩，二者相间布置并相互咬合。高强度素混凝土桩的设计进一步增加了在硬岩层中钻进成孔的难度。

本项目的设计与施工主要遵循合同规定的国际通用标准。为清晰、定量地阐述施工过程中的关键控制参数与技术逻辑，本文在论述中将部分参考技术原则相通的中国规范(如 JGJ、T/CECS 系列)中的具体指标。此举旨在为所述技术措施提供一个广泛认可的量化参考基准，便于技术交流与理解。

这一创新路线虽从根本上解决了孔壁稳定问题，但也在从护筒沉设到后续结构施工的完整链条中，引发了一系列顺序性的新挑战。本文旨在遵循施工流程，还原问题发生的真实场景，并阐述在每个关键节点上所采取的针对性、务实性对策，同时客观分析主要对策带来的综合影响，重点揭示当现场条件导致原设计工法失效时，如何进行包含技术经济权衡的安全可靠的结构再设计与施工。

2. 整体工艺路线：无泥浆护壁的全钢护筒干法施工

本工程核心工艺为：首先，使用旋挖钻机在无支护状态下直接钻穿上部软弱覆盖层(回填土及淤泥层)，直至石灰岩层面；随后，下入长度 8 米以上的钢护筒，并利用高频振动锤将其底部沉设至稳定嵌入石灰岩层中[2]。护筒在此位置固定，不再移动，为上部软弱地层提供刚性的、固定的侧向支撑[3]。此后，所有后续作业(护筒内的岩层钻进、清孔、钢筋笼安装及混凝土灌注)均在此固定的钢护筒内进行。该工艺彻底规避了泥浆护壁在软土中的失效风险，并为成桩作业提供了一个稳定不变的作业空间。

3. 按施工顺序排列的关键问题与对策

3.1. 问题一：长钢护筒在超软弱地层中的轴线综合偏差控制

问题本质：在流塑状淤泥中沉设长达 8m 的钢护筒，并使其底部稳固坐于石灰岩层。此过程面临轴线双向偏差挑战：一是垂直度偏差(倾斜)，影响桩身受力；二是平面位置偏差(偏离设计中心)，直接影响后续井壁施工空间。由于地层的极端软弱性，完全消除偏差不现实，核心在于将其控制在公认的严格标准内。

系统性控制对策：

1. 过程协同控制：采用“孔口导向定位→振动沉设→光学监测(双经纬仪)→动态微调”的闭环流程。核心是通过实时监测数据，在沉设过程中对垂直度与中心偏位进行主动干预与纠正。

2. 验收与决策依据：护筒沉设固定后，进行最终测量。测量结果作为后续施工决策的关键输入。若偏差控制在如垂直度 $\leq 1\%$ 、中心偏位 $\leq 50\text{ mm}$ 等典型严格要求范围内(与中国《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2008 等标准的原则一致)，则按原计划进行；若偏差超出限值，则为后续问题埋下伏笔。

3.2. 问题二：石灰岩层钻进工效低与钻头非正常损耗

问题详述：场地石灰岩层强度不均(25~40 MPa)，且设计要求 A 桩(素混凝土桩)的混凝土强度等级高达 C40/C50，这意味着对桩身完整性及沉渣控制要求极为严格，进一步加剧了在硬岩中成孔的难度与质量控制压力。此类高标准的桩身质量控制要求，在相关规范中均有明确体现[4]。通用钻头在此类非均质岩层中作业时，常因“打滑”导致纯磨损而无进尺，或因“卡滞”承受偏载冲击而异常破损。

细化技术对策：

1. 建立多功能钻头配置体系：现场配置三类主力钻头：① 截齿钻头，适用于均质中硬岩层；② 牙轮筒钻，用于克取极硬岩层或结核；③ 螺旋钻头，用于处理裂隙发育的破碎岩块。

2. 实施岩性判别与动态适配：依据机械参数(压力、扭矩)、声振反馈及返渣岩样，快速判断岩层特性[5]。一旦判定钻头不适应(如进尺异常缓慢)，立即决策更换。

3. 钻具的标准化维护管理：建立钻具管理台账，严格执行每日检查与磨损超标更换制度。

3.3. 问题三：钢筋笼保护层厚度控制失效

问题详述：在钢护筒形成的狭窄空间内(净空约 100~150 mm)安装钢筋笼，传统砂浆垫块易压碎或移位，导致钢筋笼紧贴护筒壁，造成桩身局部保护层缺失甚至钢筋裸露，这直接违反了确保结构耐久性的基本设计原则[4]。

细化技术对策：

1. 应用高强度专业化定位部件：采用工厂预制的 C50 及以上强度等级的混凝土圆饼形定位垫块，通过预埋铁丝，在主筋与箍筋的每一个交叉点进行牢固安装。此类旨在确保保护层精度的工艺要求，在相关技术规范中均有规定[4]。

2. 孔口强制性对中定位工艺：使用可重复使用的十字形孔口定位器，确保钢筋笼在护筒内居中下放。

3. 设置抗上浮与防扭转锚固系统：在钢筋笼顶端设置抗浮钢筋，将其上部可靠锁定在护筒顶部，抵抗混凝土灌注时产生的上浮力与扭转力矩，这也是保证钢筋笼设计位置稳定的通用做法[4]。

3.4. 问题四：起拔护筒过程中的混凝土流失

问题详述：在完成水下混凝土灌注后、混凝土初凝前，起拔长钢护筒是成桩的关键环节，其时机控制是通用施工原则[4]。由于护筒外壁与周围流塑状土体之间存在因振动沉设形成的环形缝隙，当护筒被向上拔出时，其底部脱离已浇筑的混凝土面。此时，孔内尚具流动性的混凝土在自重和上部压力下，极易从护筒底部与混凝土面之间新出现的间隙，挤入护筒外壁与土体间的环形薄弱通道，并沿此外部路径向上渗流至地面，形成“冒浆”。此现象直接导致桩身混凝土的有效方量减少，是造成桩顶标高低于设计值的主要原因。

细化技术对策：基于起拔控制的防流失与实时补偿工艺

1. 优化起拔时机与过程控制：

时机选择：通过混凝土配合比设计与现场凝结试验，确定合理的起拔窗口期。起拔应在混凝土灌注完毕后、初凝开始前进行，确保混凝土已具备一定的塑性强度，能够抵抗护筒起拔带来的轻微扰动，同时又能保持流动性以填充空隙，此工艺要求与通用施工指南相符。

速度与方式控制：采用液压系统控制，严格保持慢速、匀速、垂直的起拔方式，以最小化对混凝土的抽吸和扰动作用[2]。

2. 起拔后混凝土面即时监测与补偿灌注：

即时监测：护筒起拔过程结束后，立即采用测锤或专用传感器对孔内混凝土面标高进行复测，这是确保桩顶标高的标准步骤[4]。

决策与执行：若实测混凝土面标高低于“设计桩顶标高 + 预留超灌高度”，则判定发生了流失。无需等待或犹豫，立即利用原灌注导管或备用导管，向孔内补充灌注混凝土，直至混凝土面标高恢复至设计要求值。将此“即时测量 - 即时补偿”流程固化为标准工序。

3.5. 问题五：桩体偏斜导致“植筋挂网喷浆”永久衬砌工法失效及对策

问题详述：根据原设计，需在桩身植入钢筋、挂网后喷筑 100 mm 厚永久衬砌。然而，基坑开挖后揭示，部分桩体的中心偏移与倾斜，导致桩身表面至设计衬砌外轮廓线的距离严重不均，部分区域远小于 100 mm。在此条件下，原工法无法实施：既无法保证植筋的有效锚固，也无法通过喷射形成厚度均匀、连续的 100 mm 结构层，这不符合永久性支护结构的基本设计要求[6]。

技术对策：“井底台阶法”重构衬砌施工基准面

1. 应对思路的根本转变：

核心思路转变为：主动创造一个全新的、规则且充足的作业空间，以确保 100 mm 厚衬砌层能够完整、均匀地施作。

2. “台阶法”的具体实施：

1) 基准面下移：在桩体偏斜影响最严重的区段，将基坑底板局部向下超挖。

2) 构筑混凝土台阶：浇筑一个与主体结构同标号的钢筋混凝土台阶。该台阶的核心作用，是将其顶面设定为全新的、统一的衬砌施工起始面(基准面)。

3) 实现均匀厚度：从这个新基准面开始，重新绑扎衬砌钢筋网，最终立模现浇混凝土[6]。由此确保从井底到井口，整个衬砌结构任何一处的厚度均不小于设计的 100 mm。

3. 方案综合评估：

根本性解决：彻底避开了因桩体偏斜导致的施工空间不足问题，使永久衬砌结构得以按原设计要求完整实现，质量可靠。

客观代价：该方案在恢复结构功能的同时，客观导致了井底局部容积的永久性减少。经核算，因构筑台阶而损失的容积约占井总设计容积的 5%。项目团队在决策时，将“确保结构安全与完整性”与“接受有限的容积损失”进行了权衡[5]，认为前者具有绝对优先权，且该损失在项目整体功能允许范围内。

4. 实施效果与验证

通过按施工流程顺序识别并实施上述技术对策，项目在施工过程中实现了有效的过程控制，并在最终验收阶段通过了结果验证。

1. 施工过程可控性：

工期保障：针对各阶段暴露的问题(如钻进慢、混凝土流失)，所采取的动态应对措施有效化解了施工瓶颈，保障了咬合桩的成孔与灌注作业按总体计划推进，未发生因技术难题导致的整体进度停滞。

工序质量受控：通过护筒沉设的实时纠偏、钻头的适配更换、钢筋笼的精准定位以及起拔护筒后的混凝土面即时补偿等过程控制手段，确保了每一道工序的输出质量(如护筒垂直度、孔底沉渣厚度、钢筋笼就位、桩顶标高)符合严格的规范要求[4]，为最终成桩质量奠定了基础。

2. 最终质量验证(基坑开挖后)：

基坑全面开挖后，桩基及后续结构的最终质量得以显露和验证，实际情况与过程控制的成效及遗留问题均得到确认：

验证了过程控制的有效性：绝大部分桩身完整性良好，桩位与垂直度偏差在可接受范围内(达到例如中国规范 JGJ 94 [4]的同类控制水平)，证明了前期精细化施工控制是有效的。

暴露了过程的固有偏差：同时，也客观揭示出在极端软弱地层中难以完全避免的部分桩体偏斜问题，这与“问题一”的分析及类似软土工程的经验相符。

验证了终极解决方案的可行性：正是针对开挖后暴露的偏斜问题，所实施“井底台阶法”发挥了关键作用。该方案成功地将“已发生的、影响后续施工的偏差”转化为“可量化、可解决的技术问题”，最终重构出的永久衬砌结构，其厚度、强度及整体性经验收，均满足了设计的安全与使用功能要求[6]，同时其带来的约 5%的容积损失被确认在可接受范围内。

5. 结论

对于潮间带极软地层中采用“全钢护筒”工艺的地下隐蔽工程，其成功实施依赖于对“施工过程控

制”与“最终结果处理”全周期的系统性管理，并贯穿了技术可行性与工程经济性的综合权衡[5]。中东某项目取水井单体结构桩基工程实践表明，在面对高强度咬合桩(C40/C50 素混凝土桩)的严苛要求时：

1. 过程精细化控制是基础：通过序贯性的技术对策(如轴线偏差动态纠偏、钻头动态适配、钢筋笼精准定位[4]、起拔控制与混凝土补偿)，能够有效管控各工序质量，保障施工效率，并为最终成桩质量提供最大可能性的保障。

2. 正视、量化并管理残余风险及其代价：在极端地质条件下，完全消除施工偏差(如桩体偏斜)往往不现实。基坑开挖会客观暴露这些残余风险及其后果。对此，不仅要有应对预案，更应量化评估解决方案的综合性影响(如“井底台阶法”导致的约 5%容积损失)，在“保障核心功能”与“接受次要代价”之间做出明确的、基于数据的工程决策[5]。

3. 具备结构性再设计与综合决策能力是关键：“井底台阶法”的成功应用，不仅是一项技术创新，更是一套完整的工程问题解决方法论。它展示了在既定设计路径失效后，如何通过结构性基准重构来保障核心功能，并清晰界定和接受由此产生的、可控的次要代价(容积损失)。这体现了现代工程管理中技术、功能与成本进行一体化权衡的成熟思维[5]。

本文按施工顺序梳理的五个问题与对策，特别是从“过程控制”到“结果验证、问题修复与代价评估”的完整逻辑，构成了一份应对类似极端条件桩基工程的系统性风险管理与综合性决策框架，具有直接的实践参考与借鉴价值。

参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 王成华. 桩基工程振动沉桩理论与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 黄强, 刘金砺, 高文生, 等. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 陈云敏, 熊巨华, 李镜培. 桩基工程理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 中国. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.