



大直径植入式钢管嵌岩桩施工技术

杨胜生，杨建冲

(中交第四航务工程局有限公司，广东 广州 510290)

摘要：浮式液化天然气接收和再气化终端平台(FRU)采用嵌固于海底的钢管桩加抱箍系泊方式，用以制约FRU的水平位移并承受波浪引起的作用力。该桩型主要特点是采用超厚钢管，嵌岩深度大，桩径大，施工难度高。经过专项方案的比选和研究，提出采用搭设水上施工平台、扩大孔径冲击成孔、整体植入钢管桩、在钢管下部预留孔洞、浇筑水下混凝土的施工工艺。该工艺较好地解决了嵌岩桩钢管内、外壁混凝土整体性问题，确保了工程质量，可供类似工程借鉴。

关键词：植入式钢管嵌岩桩；FRU 系泊桩；植入式挤实锚固；水下混凝土浇筑

中图分类号：U 655.4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)04-0197-06

Construction technology of large-diameter implanted steel pipe for socketed pile

YANG Sheng-sheng, YANG Jian-chong

(CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The floating regasification unit (FRU) of liquefied natural gas (LNG) adopts a mooring method with steel pipe piles and hoops to restrict its horizontal displacement and sustain waving force. The steel pipe piles are socketed into the seabed. This pile type is characterized by a thick pipe shaft, a great rock-socketed depth, a large diameter and hard construction. According to comparison and study on special programs, we propose the construction technology including building offshore construction platforms, enlarging piling holes, inserting integral steel pipe piles, presetting holes at the lower part of the steel pipes and casting underwater concrete. The technology helps well solve the problem regarding the integrity of concrete inside and outside the socketed pile and ensures the quality of the structure. It may serve as reference for similar projects.

Keywords: implanted steel pipe for socketed pile; mooring pile for FRU; consolidation and anchorage with implantation method; underwater concrete casting

浮式液化天然气接收和再气化终端平台(floating regasification unit, 简称FRU)因作业特殊要求一般采用抱箍锚定方式^[1]，这要求锚桩能承受较大的水平力，因此锚桩设计一般采用大直径厚壁钢管，入岩深。樊金等^[2]、边锋等^[3]对植入式嵌岩桩均有研究和总结。但对于海工特殊结构需要采用超厚壁大直径钢管嵌岩桩的设计和施工技术研究较少。加纳特码LNG码头工程设计采用大直径植入式挤实锚固钢管钢筋混凝土结构。本文介绍该工艺的设计要求、施工方法和控制要点，为类似工程提供参考。

1 工程概况

加纳特码LNG码头项目包括防波堤、码头、港池疏浚和海底管沟开挖和回填等建设。其中码头为离岸式墩台结构，含2个靠船平台和5个系缆墩，在2个离岸式靠船墩之间设计有6根钢管锚定桩(图1)。为固定该LNG FRU(浮式再气化装置)，设计采用6根钢管锚定桩，位于2个离岸式靠船墩之间(图1)。钢桩外径2.5 m，桩长38.45 m，钢管壁厚5/6 cm(-12 m以下采用6 cm)，初步设计要求钢管桩嵌入基岩的深度不小于10 m。

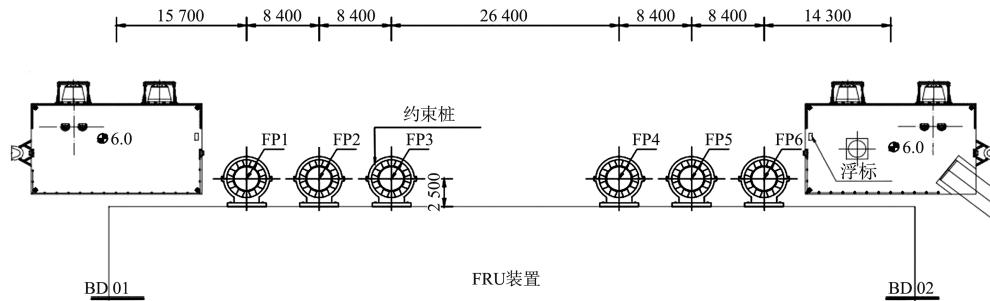
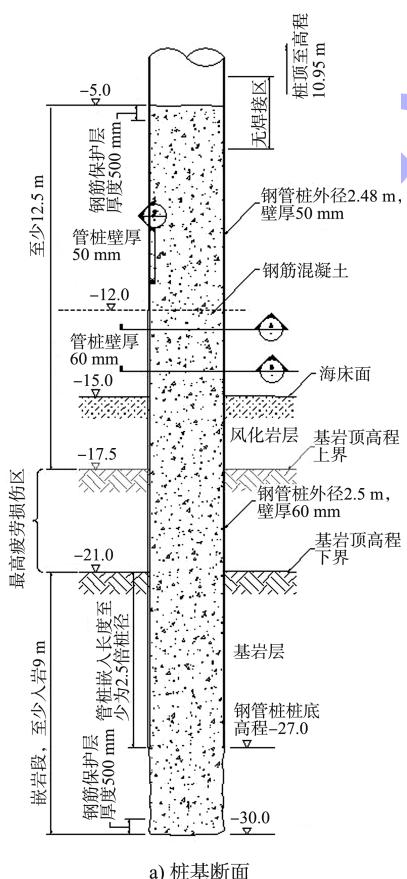


图 1 钢筋混凝土芯柱钢管桩设计平面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 设计方案优化

按原设计方案施工(图2),采用灌注型嵌岩桩结构形式,常规施工工艺为打入钢管→在孔内冲钻成孔→接桩→继续施打钢管至设计高程→继续冲钻孔至设计高程→清孔→下放钢筋笼→浇筑水下混凝土^[4]。该方案需要调遣专业打桩船施工钢管桩、搭设施工平台、桩内嵌岩、水上接桩、钢管桩复打、桩内灌注钢筋混凝土等施工工序,需要动用的大型设备多,工序复杂,施工周期长,施工成本高,特别是超厚钢管现场对接,难以保证质量。



a) 桩基断面

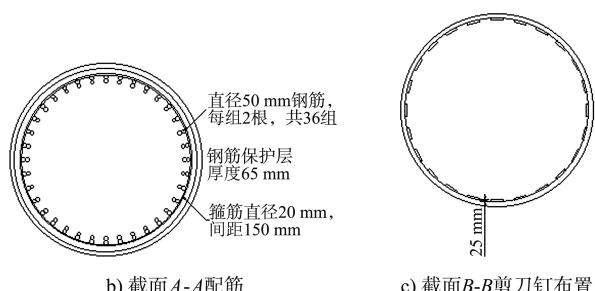


图2 灌注型嵌岩桩设计断面 (高程: m)

根据当地设备情况，将原设计方案优化为植入式嵌岩结构形式(图3)，新方案的主要优点在于可以减少大型设备投入、减少水上接桩环节、缩短工期、节约施工成本、确保工程质量。

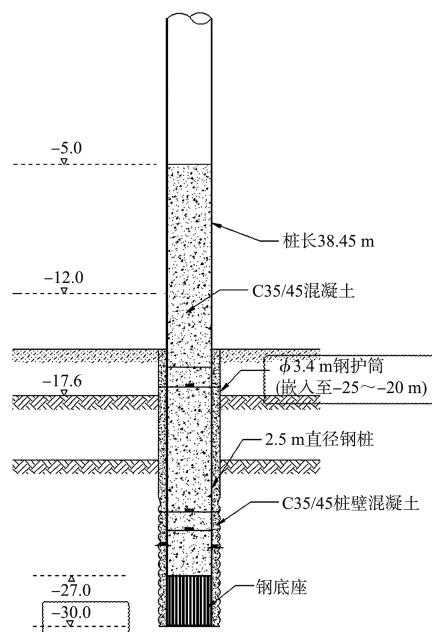


图 3 植入式嵌岩桩设计断面 (高程: m)

3 技术原理及工艺流程

采用冲孔设备直接冲击大于桩外径的桩孔，清空完成后，采用举重船吊装植入钢管桩，植桩

完成后进行钢筋笼安放, 最后进行水下混凝土灌注, 混凝土终凝后, 钢管和基岩成为整体^[5]。采用冲击成孔工艺, 冲击锤直径为 3.0 m, 施工临时护筒内径 3.36 m, 护筒以下冲孔孔径平均为 3.2 m, 钢桩和孔壁的间隙宽度为 35 mm; 桩内混凝土浇筑高程至 -4.5, 钢桩与孔壁之间混凝土浇筑高程至 -14.5, 单根桩浇筑方量约为 168 m³。

4 关键工艺技术

4.1 水上冲孔桩成孔

4.1.1 施工平台搭设

FRU 桩施工前需搭建海上施工作业平台, 支撑桩基采用直径 80 cm/100 cm 钢管桩, 主梁采用 3 排单层贝雷架, 次梁采用双 56 a 工字型钢, 上部铺设用 25 a 工字型钢, 面上铺设 6 mm 钢板。

4.1.2 冲击成孔

工程所在区域上部覆盖约 3 m 厚的砂质黏土层, 往下依次由强风化至微风化的片麻岩层。在项目实施时, 外护筒采用壁厚 δ16 mm 直径 3.4 m 的钢护筒, 采用振动锤施工将钢护筒打入覆盖层, 冲孔桩机配直径 3 m 重 15.5 t 的冲锤, 从原泥面约 -15 m 冲孔至 -30 m, 冲孔至指定高程后, 进行清孔。在清孔结束后进行孔深、垂直度和孔底沉渣厚度的检测。为防止孔内漏浆和塌孔, 将强风化层进行扩孔冲孔并及时跟进护筒, 通过在锤腿上焊接边牙(直径 14 cm 的钢棒或 14 cm 高的钢轨), 将锤径由 3 m 扩大到 3.28 m, 强风化层每冲进 1~1.5 m, 用振动锤继续施工护筒, 直到护筒跟进至中风化层面, 再改回原 3 m 锤径继续冲孔至设计高程。

4.2 植入钢管桩

4.2.1 钢管桩加工

FRU 钢桩由专业厂家生产制作, 钢管外径 2.5 m, 设计桩长 37.95 m, 其中上部段 -12~-10.95 m 钢管壁厚 5 cm, 下半段 -27~-12 m 段钢管壁厚 6 cm, 采用 E355 J2 钢板卷制, 桩外侧 -1 m 高程

以上进行防腐涂层处理, 内部 -27~-5 m 处设置环向布置剪力键。考虑成孔时施工误差, 安装时保证顶部高程不低于设计高程 10.95 m, 制作钢桩时桩身加长 50 cm, 同时钢桩底部焊接长 3 m 的支撑底座, 故实际整桩总长为 41.45 m, 总质量约为 132 t(图 4)。

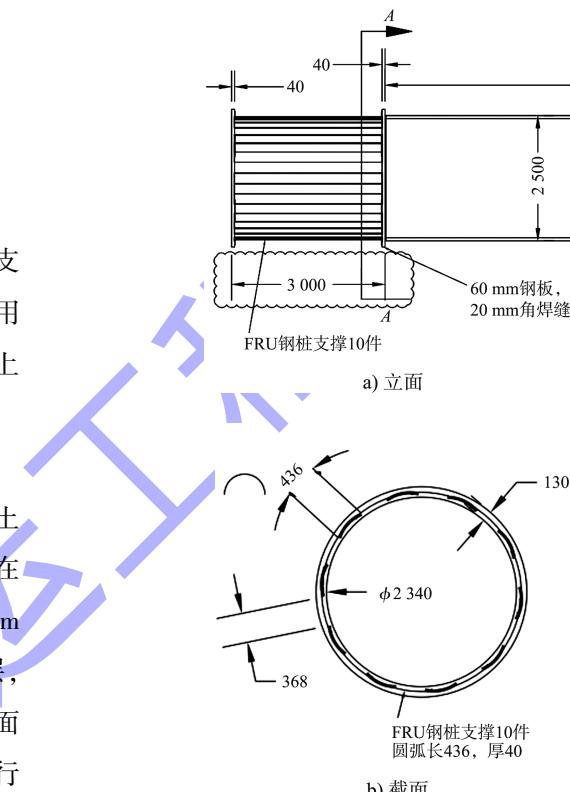


图 4 钢桩底部剖面(单位: mm)

4.2.2 钢管桩运输

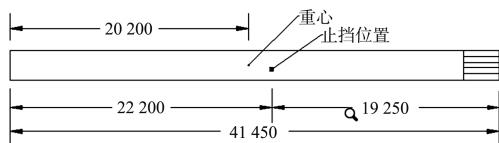
钢管桩出厂前, 经检查验收合格后通过海运运至施工现场。

4.2.3 钢管桩安装

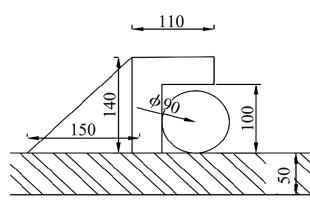
经过受力计算, 在距离桩顶 150 mm 位置钻设直径 100 mm 的吊孔, 孔位按照水平对称布置, 采用 110 t 卸扣插芯直径 83 mm, 其开口 127 mm, 内净深 320 mm。

焊接止挡块: 根据钢桩和支撑底座的质量分布, 计算钢桩水平的重心位置距离桩顶 20.2 m, 在重心位置偏向底部 2 m 位置, 两侧各水平对称焊接 1 个止挡, 用于水平起吊和直立钢桩时防止

钢丝绳滑动。止挡块采用 4 cm 厚钢板作为肋板，2 cm 厚钢板双层拼接作为立板。焊缝高度 20 mm，棱角进行打磨处理(图 5)。



a) 钢桩立面及止挡块位置

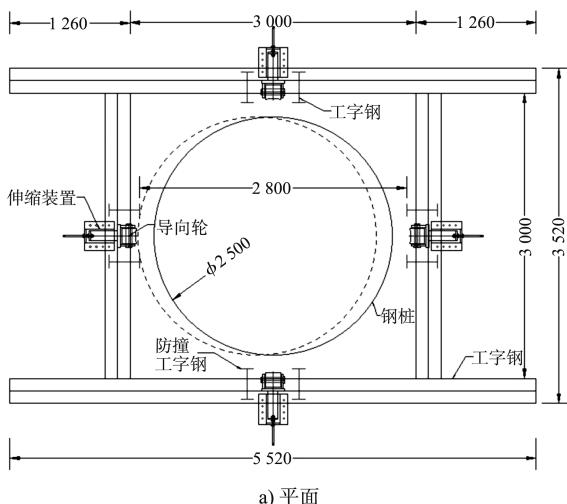


b) 止挡块剖面

图 5 止挡块位置及剖面 (单位: mm)

4.2.4 稳桩架制作和安装

设计要求：钢桩安装平面位置偏差 ≤ 100 mm，垂直度 $\leq 0.5\%$ ，在水下混凝土浇筑完成 48 h 内，桩身必须保持稳定，不能发生移动。因此需要设计制作具有导向、平面位置和桩身垂直度调整、刚性稳固作用于一体的稳桩架。稳桩架的主框架由双 32 工字钢上、下 2 层布置，在每层 4 个方向安装可伸缩的导向轮，用于钢桩入孔后桩位和垂直度的调整。由于水上安装时船舶有一定摆动，为方便钢桩定位入孔，在上、下 2 层 4 个方向各设置 1 对喇叭口的工字钢(图 6)。



a) 平面

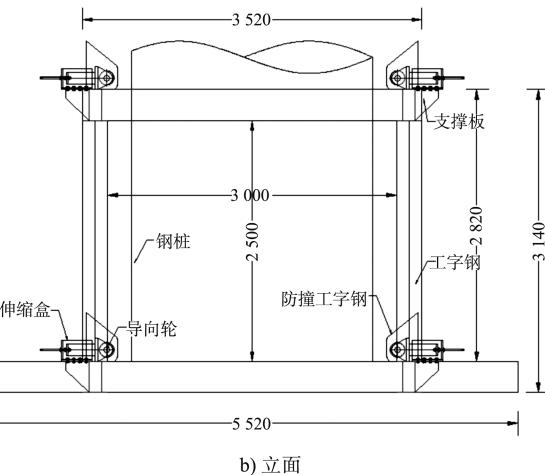


图 6 稳桩架平面和立面 (单位: mm)

4.2.5 钢管桩吊装

钢管桩吊装时采用 500 t 起重船，就位后，立即对钢桩进行临时加固。钢管桩吊装就位后的验收数据显示，安装平面偏差 <35 mm，垂直度偏差 $<0.15\%$ ，使用该稳桩架，方便钢桩吊装入孔，起到了导向、微调、固定的作用，获得了较好的效果。

4.3 桩内钢筋笼安放

钢筋笼外径为 2.2 m，长 24 m，安装顶、底高程分别为 -5.5 和 -29.5 m，其主筋和箍筋分别为双 $\phi 50$ mm 和双 $\phi 20$ mm 的螺纹钢，其中主筋采用套筒连接，箍筋采用搭接方式连接，总质量约 33 t。根据现场情况，钢筋笼采用整体制作安装的方案。为防止钢筋笼转运安装过程中发生较大变形，也方便钢筋笼制作，在其内侧按每 3 m 间距布置一个圆环式内撑，6 根声测管沿着圆环均匀布置。

4.4 桩内混凝土浇筑

4.4.1 混凝土配合比

水下混凝土配合比的设计，除了保证设计强度外，还必须具有良好的缓凝性、流动性、黏聚性和保水性。配合比设计采用连续级配骨料，同时，混凝土的初凝时间的确定综合考虑了海上运输、浇筑时间等因素。经多次试验确定，采用 C45 的水下自密实细石混凝土，粗骨料的最大粒径 20 mm，细骨料选用级配良好的中砂，混凝土初凝时间为 7 h(表 1)。

表1 桩内混凝土主要性能

混凝土配合比 (水泥:砂:小石:大石:掺和料:外添加剂:水)	水胶比	密度/(kg·m ⁻³)	坍落扩展度 e	混凝土强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
1:2.16:1.04:1.93:0.32:0.016:0.48	0.36	2 480	580	-	46	55.6

4.4.2 首灌混凝土体积计算与导管、料斗选用

根据《码头结构施工规范》,首次灌注混凝土的体积应能满足导管初次埋深不小于1 m的要求,按式(1)计算:

$$V \geq \pi D^2 (H_1 + H_2)/4 + \pi d^2 h_1/4 \quad (1)$$

式中: D 为冲孔直径(m),暂取3.2 m; H_1 为桩孔底至导管底端间距,取0.3 m; H_2 为导管初次埋置深度,取1.0 m; d 为导管内径,取0.325 m; h_1 为桩孔内混凝土达到埋置深度 H_2 时导管内混凝土柱平衡导管外泥浆压力所需的高度(m),取 $1.06 \times (36 - 1.3) / 2.4 = 15.3$ m。在潮位1.3 m时,计算得 $V \geq 11.72$ m³。

导管采用直径30 cm无缝钢管制作,配置1大1小2个料斗储料,即小漏斗3.5 m³,连接导管,大漏斗8.5 m³,用于储料。

4.4.3 浇筑过程控制

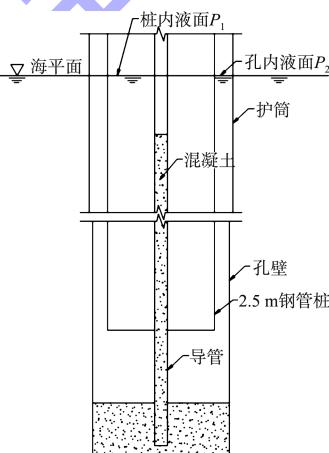
水下混凝土的浇筑是关键工艺,对浇筑过程不同阶段进行分析,可以分为以下4个阶段(图8)。

1)阶段1:水下混凝土在-27.0 m以下时,混凝土还未进入钢管桩内,钢管桩内、外是连通的,同时护筒在施工低潮位以下预留有排水孔,因此桩内压强 P_1 、孔内压强 P_2 与护筒外液面相同,桩内外混凝土作为一个整体,无压差变化。

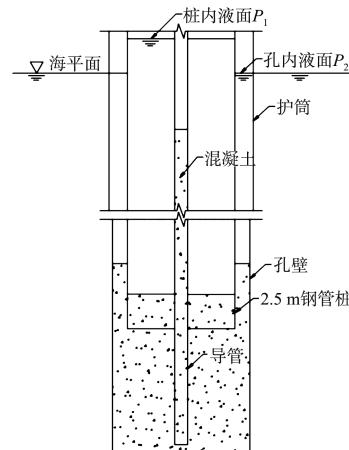
2)阶段2:随着浇筑的进行,水下混凝土上升到-27.0 m以上,浇筑至钢管桩内部时,钢桩桩内与桩外隔绝,桩内水柱高度约28 m,并随着桩内混凝土上升而上升;而钢桩与桩壁间的液面与外界连通,水位不变,钢桩内与孔内开始形成压力差,且桩内 $P_1 >$ 桩壁 P_2 。受压力差影响,桩壁间混凝土高程开始略高于桩内混凝土,以保持内外压力平衡。

3)阶段3:继续浇筑,桩内浇筑至-18.5 m时,按照压强平衡,孔壁的混凝土已上升到-14.9 m。为了阻止桩壁混凝土继续上升,需要在桩内减压,通过在桩内设置水泵外排的方式,边抽水边浇筑,桩内混凝土还可继续上升。

4)阶段4:当孔内水被抽干时,此时桩壁间混凝土高程仍为-14.9 m,桩内混凝土高程为-8 m,无法再通过抽水进行调压,需要停止浇筑,等待半小时,在把桩内混凝土浇筑至设计高程。



a) 阶段1



b) 阶段2

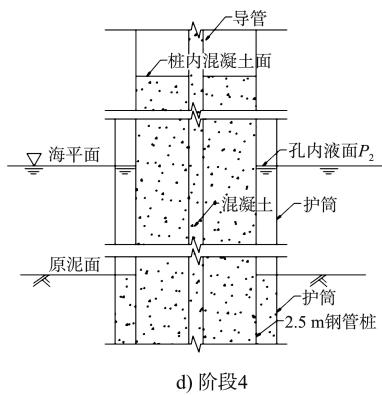
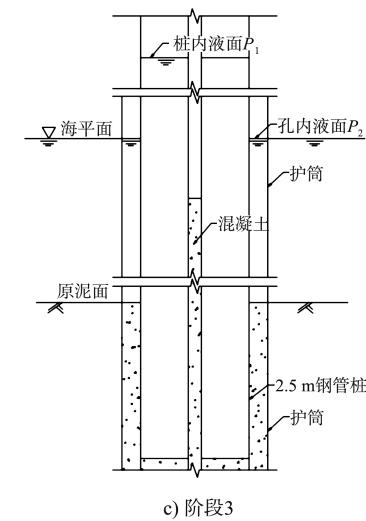


图 8 水下混凝土浇筑状态

首灌完成后，连续累计浇筑 50 m^3 混凝土，桩内混凝土在钢桩底以上 3 m，混凝土面在 -24.0 m，此时开启水泵向桩内注水，以增大内外的正压差，同时继续浇筑，从而进一步抬高桩壁混凝土高程，同时抑制桩内混凝土液面的提升，确保导管的埋深不超过允许值^[6]。

当钢桩外混凝土上升到 -14.5 m 时，开始用水泵反向抽出钢桩内水，同时适当放慢浇筑速度，测算桩内外的压力差和导管埋深，在保证桩内压强 P_1 略大于桩外压强 P_2 的前提下，通过抽水减压，将桩内混凝土液面随着浇筑而抬升，同时逐节提升导管。在施工过程中发现，当导管位于桩底 4 m 以上时，导管有效作用半径已高于钢桩底部，对孔内混凝土的影响减小，即孔内混凝土高程基本保持稳定不变。并使用砂袋，沿着桩外壁

一圈，将砂袋填入间隙内，暂停半小时，继续浇筑桩内混凝土至设计高程，并随时监控桩内外高程的变化，核算其和理论上上升的高度是否有偏差。最终经超声波检测，桩身完整，判定为 I 类桩。项目投入使用后，经半年持续观测没有发生偏移、沉降等现象。

5 结语

- 1) 加纳特码 LNG 码头项目利用当地现有设备资源，在原有锚固嵌岩桩设计方案的基础上优化成大直径植入式挤实锚固嵌岩桩。
- 2) 将直径 3.4 m 的外护筒打入覆盖层，然后冲孔至强风化层，护筒同时跟进，冲孔直至中风化层。
- 3) 直径 2.5 m 钢桩采用起重船安装就位，再继续安装钢筋笼。
- 4) 利用钢桩内外壁的水头压力差，桩壁间混凝土可浇筑至 -14.5 m，控制钢桩内水位，先将混凝土浇筑至 -8 m，停止半小时后再浇筑至设计高程。

参考文献：

- [1] 宋伟华, 李恬, 程哈峰, 等. 浮式储存及再气化装置(FSRU)码头特点及其设计要点[J]. 水运工程, 2021(4): 39-43, 69.
- [2] 樊金光, 张俊娟, 李潮雄. 植入式钢管嵌岩桩水下施工技术应用案例[J]. 土工基础, 2013, 27(4): 66-69, 73.
- [3] 边峰, 王志勇, 刘淑伟, 等. 预制型植入嵌岩桩设计与施工研究[J]. 工程与建设, 2020, 34(3): 505-506.
- [4] 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- [6] 董徐奋. 导管法浇筑水下混凝土的质量控制[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(3): 119-121.